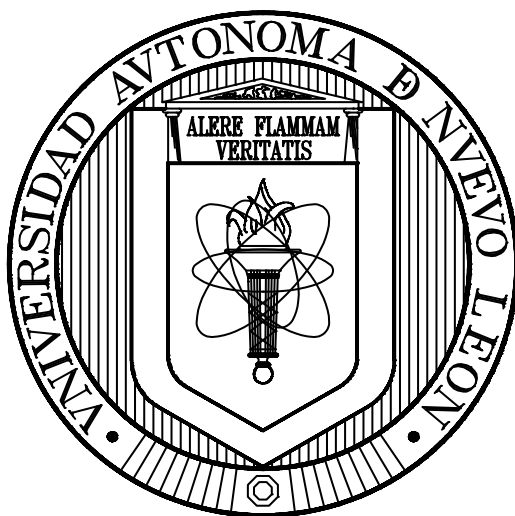


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
TIERRA**



**ZONIFICACIÓN Y DETECCIÓN DE
RIESGOS GEOLÓGICOS EN EL FLANCO
SUR DEL CERRO DE LAS MITRAS**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

PRESENTA

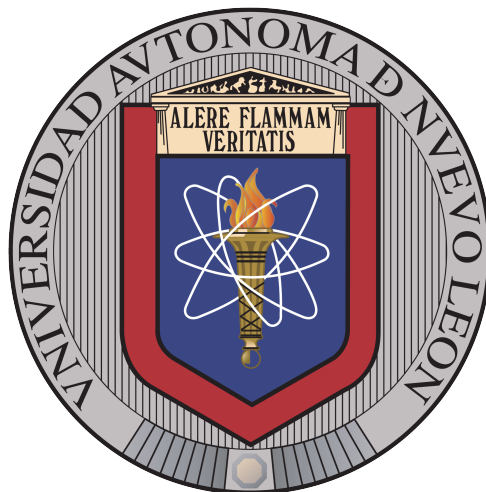
ING. DANIEL VIVEROS RAMÍREZ

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MAYO 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
TIERRA**



**ZONIFICACIÓN Y DETECCIÓN DE
RIESGOS GEOLÓGICOS EN EL FLANCO
SUR DEL CERRO DE LAS MITRAS**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

PRESENTA

ING. DANIEL VIVEROS RAMÍREZ

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MAYO 2019



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
TIERRA**



LA TESIS

**“ZONIFICACIÓN Y DETECCIÓN DE RIESGOS
GEOLÓGICOS EN EL FLANCO SUR DEL CERRO
DE LAS MITRAS”**

QUE PRESENTA

ING. DANIEL VIVEROS RAMÍREZ

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo. del Director de Tesis

Dr. José Rosbel Chapa Guerrero

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MAYO 2019



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
TIERRA**



LA TESIS

**“ZONIFICACIÓN Y DETECCIÓN DE RIESGOS
GEOLÓGICOS EN EL FLANCO SUR DEL CERRO
DE LAS MITRAS”**

QUE PRESENTA

ING. DANIEL VIVEROS RAMÍREZ

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

EL COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS

Dr. José Rosbel Chapa
Guerrero

Dr. Gabriel Chávez Cabello

Dr. Sóstenes Méndez Delgado

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MAYO 2019

Por este medio, declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios y procedimientos descritos en la misma.

Daniel Viveros Ramírez
Linares, Nuevo León, 2019

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a esa Fuerza que permite que todo se realice y se lleve a cabo, gracias por darme la oportunidad de vivir estos momentos con salud física y psicológica, poder lograr otra meta y compartirla con otras personas. Gracias Dios, Jehová, Gaia, G.A.D.U, Krishna o como el lector guste llamarle.

A mis padres y mi hermano, con su apoyo todo es posible y si no lo es, nunca duden de que con su apoyo lo intentaré por más imposible que parezca. Gracias por todas las fuerzas que inyectan en mi y me permiten avanzar, gracias infinitas por tanto que me dan. Con todo mi ser para ustedes.

A Perla, por estar ahí ayudando a levantarme y limpiar mi cara cada que me caía durante los dos años, por darme amor y comprensión en tantos momentos de disgustos y presión. Con todo mi corazón para ti, Perliceey.

A Isabel, por se la amiga incondicional desde que te conocí y apoyarme en sacar adelante mis sueños, sin importar cuales fueran. Con toda mi alma para usted, Isabelinha.

Para la población de los municipios de Santa Catarina y San Pedro Garza García, son parte de la gente que me ha visto crecer y en manera de darles un poco de retribución de lo que me han dado, este trabajo es para ustedes.

Para ti lector que de alguna manera diste con este trabajo ya sea por investigación o por accidente. Espero que este trabajo te parezca interesante, te sirva, lo puedas utilizar y lo puedas mejorar.

Con todo mi amor para todos ustedes.

Agradecimientos

Agradezco a Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me otorgó para la realización de este trabajo de investigación. Así mismo, quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a la Facultad de Ciencias de la Tierra (FCT) por brindarme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo mediante su programa de posgrado y sus instalaciones.

A mis asesores, al Dr. José Rosbel Chapa Guerrero director de esta tesis, por todo el apoyo y confianza a mi persona desde antes de comenzar. A los doctores Gabriel Chávez Cabello y Sóstenes Méndez Delgado por sus aportaciones y apoyo para la mejora de este trabajo. A los tres, por las llamadas de atención y la paciencia para darme lecciones no solo en el ámbito profesional, sino también en la vida.

Gracias a los estudiantes de licenciatura que me apoyaron en el trabajo de campo: Alan, Abraham, Leyla, Diego, Edgar, Gildardo, así como al LQI José Aguirre.

A todo el personal docente, al personal administrativo y al personal de intendencia que siempre me ayudo y estuvo dispuesto a tenderme la mano.

Gracias a mis compañeros de posgrado, que se volvieron mi otra familia. Gracias Rafa, Tony, Fede (MYTS) por estar ahí apoyando a su manera, un tanto sutil, en las clases que compartimos como en los apuntes y datos para enriquecer nuestros trabajos.

Gracias Cecilia por tu paciencia, por todo tu apoyo aun cuando no lo merecía y por todos esos días en los cuales no permitiste que me rindiera.

Gracias a la Ing. Guarín y a mi familia que siempre me apoyaron de diversas maneras con tal de que pudiera cumplir esta meta. A todos los aquí nombrados y los que me faltaron por cuestión de espacio o memoria, GRACIAS, sin ustedes esto no pudiera ser.

Resumen

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es la tercera ciudad más importante de México, siendo la ciudad principal del noreste del país. Además cuenta con una población mayor a los 4 millones de habitantes, esto, aunado a la falta de espacios habitacionales y al deseo de las personas de estar lo más cercano al centro de la ciudad y de sus empleos. Esto ha provocado, desde la década de los 70's, un crecimiento descontrolado de la mancha urbana, dando lugar a la población civil de asentarse en zonas montañosas.

A lo largo del tiempo, las zonas de laderas van cambiando su morfología debido a diferentes procesos geológicos e hidrometeorológicos que afectan los materiales existentes (roca y suelo), los cuales, se van acomodando de diferentes maneras en busca de un relajamiento físico, que les permita tener un equilibrio. Ignorando estos procesos, la población, que habita estas zonas, se encuentra en constante riesgo, ya que los procesos antes mencionados pueden ocasionar movimientos en masas que afecten la infraestructura existente, así como la vida misma de las personas. Si a los procesos antes mencionados se le añaden procesos antropológicos, como lo son cortes de ladera y excavaciones, sin las medidas y el conocimiento adecuado, con el fin de crear nueva infraestructura en la zona, dichas zona se vuelve aún más vulnerable y por lo tanto más riesgosa para la población.

Dentro del AMM existen varias zonas de laderas en desarrollo urbano, las cuales se enumeran a continuación: Cerro de la Silla, Cerro del Mirador, Cerro del Topo Chico, Cerro de la Loma Larga y Cerro de las Mitras, siendo este último el área objetivo de estudio. El cerro de las Mitras es una elevación montañosa, cuya característica geológica está constituida por una secuencia cretácica: calizas, lutitas y margas, formando un braquianticlinal. Dicha estructura se localiza entre los municipios de Monterrey, García, San Pedro Garza García y Santa Catarina.

La elaboración de este estudio permite tener un mejor control en cuestiones geotécnicas, en próximos asentamientos humanos en estas zonas o en otras zonas que puedan ser sometidas a estudios bajo esta metodología. Además, se establece un mejor control, a través planificación y prevención, de los riesgos que afectan a esta región, resaltando la mitigación a las colonias ya existentes.

Abstract

The Metropolitan Area of Monterrey (MAM) is the third most important city of Mexico, being the principal city of the northeast of the country. It also counts with a population of 4 million of habitants, this, coupled to the lack of housing spaces and the desire of the people to live as close as possible of the city center and their employments. This has caused, since the decade of the 70's, an uncontrolled growth of the urban spot (patch), leaving place to the civil population to settle in mountainous areas.

Over time, hillside areas begin to change their morphology due to different geological and hydrometeorological processes, that affect the existing materials (rock and soil), which are accommodating in order to find physical relaxation, that allows them to balance. Ignoring this processes, the population, that inhabits this zones, is in constant risk, since the aforementioned processes can cause movements in the masses that affect the existing structure, as well as the very life of the people living there. If anthropological processes are added to the aforementioned processes, such as hillside cuts and excavations, without adequate measures and knowledge, in order to create new infrastructure in the area, said area becomes even more vulnerable and therefore much more risky for the population.

Within the MAM there are several areas of slopes in urban development, which are listed below: Cerro de la Silla, Cerro del Mirador, Cerro del Topo Chico, Cerro de la Loma Larga y Cerro de las Mitras, being the last one the area objectively of study. Cerro de las Mitras is a mountainous elevation, whose geological characteristic is constituted by a Cretaceous sequence: limestones, shales and marls, forming a brachyanticline. This structure is located between the municipalities of Monterrey, García, San Pedro Garza García and Santa Catarina.

The elaboration of this study allows to have a better control in geotechnical issues, in future human settlements in these zones or in other zones that can be submitted to this methodology. Also, a better control is established, to turn planning and prevention, of the risks that they affect to this region, highlighting the mitigation to the already existing local communities.

Índice

Lista de figuras	v
Lista de tablas	ix
1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Problemática	1
1.3. Localización	4
1.4. Antecedentes	5
1.5. Justificación e Hipótesis	7
1.5.1. Justificación	7
1.5.2. Hipótesis	8
1.6. Objetivos	8
1.6.1. Objetivo General	8
1.6.2. Objetivos Particulares	8
1.7. Metodología	9
1.7.1. Trabajo bibliográfico	9
1.7.2. Trabajo de campo	9
1.7.3. Trabajo de gabinete	10
1.8. Clima y vegetación	10
2. Geología	12
2.1. Introducción	12
2.2. Geología Regional	13

2.3. Geología Local	16
2.3.1. Cretácico	17
2.3.1.1. Formación Cupido	17
2.3.1.2. Formación La Peña	19
2.3.1.3. Formación Aurora	20
2.3.1.4. Formación Cuesta del Cura	23
2.3.1.5. Formación Agua Nueva	24
2.3.2. Cenozoico	25
2.3.2.1. Cuaternario	25
2.4. Geología Estructural	27
3. Cartografía	31
3.1. Introducción	31
3.2. Cartas Base	34
3.2.1. Carta Topográfica	34
3.2.2. Carta hidrológica	37
3.2.3. Cartografía Geológica	39
3.3. Cartas Inventario	41
3.3.1. Tipos de Movimientos en Masa	41
3.3.2. Movimientos de Masa en la zona de estudio	44
3.4. Cartas de Ingeniería Geológica	45
3.4.1. Escala	45
3.4.2. Contenido de los mapas de Ingeniería Geológica	45
3.4.3. Clasificación de zonas homogéneas	47
3.4.3.1. Rocas Calizas	48
3.4.3.2. Rocas Calizas - Arcillosas	49
3.4.3.3. Rocas Arcillosas - Margosas	49
3.4.3.4. Material Cuaternario	49
3.4.3.5. Zona Urbana	49
3.4.4. Clasificación de zonas morfológicas	50

3.4.5. Carta de Zonas de Riesgos	54
4. Riesgos Geológicos	57
4.1. Carta de Peligrosidad	58
4.1.1. Agentes Condicionantes	60
4.1.2. Agentes Desencadenantes	60
4.2. Clasificación Geomecánica	63
4.2.1. Caracterización geomecánica en el área de estudio	66
4.2.1.1. Valoración geomecánica de la Formación Aurora	67
4.2.1.2. Valoración geomecánica de la Formación Cuesta del Cura	68
4.3. Análisis Cinemático de taludes	69
4.3.1. Representación Estereográfica del Círculo de Fricción	70
4.3.2. Análisis Cinemático de los macizos rocosos	71
4.3.3. Tipos de mecanismos de falla en taludes	72
4.3.3.1. Deslizamiento Planar	72
4.3.3.2. Deslizamiento tipo Cuña	74
4.3.4. Análisis Cinemático de Taludes dentro de la Zona de Estudio	76
4.3.4.1. Talud 1	77
4.3.4.2. Talud 2	80
4.3.4.3. Talud 3	83
5. Discusión, Conclusiones y Recomendaciones	86
5.1. Discusión	86
5.2. Conclusiones y Recomendaciones	88
5.2.1. Zona de Riesgo 1 (Zona urbanizada con pendiente de $0a5^{\circ}$)	89
5.2.1.1. Riesgo	89
5.2.1.2. Recomendaciones	89
5.2.2. Zona de Riesgo 2 (Zona urbanizada con pendiente de $5a15^{\circ}$)	89
5.2.2.1. Riesgo	89
5.2.2.2. Recomendaciones	90

5.2.3.	Zona de Riesgo 5 (Material Paleógeno - Cuaternario con pendiente de $5a15^\circ$)	90
5.2.3.1.	Riesgo	90
5.2.3.2.	Recomendaciones	90
5.2.4.	Zona de Riesgo 8 (Caliza arcillosa con pendiente de $> 15^\circ$)	91
5.2.4.1.	Riesgo	91
5.2.4.2.	Recomendaciones	91
5.2.5.	Zona de Riesgo 9 (Caliza con pendiente de $5a15^\circ$)	91
5.2.5.1.	Riesgo	91
5.2.5.2.	Recomendaciones	92
5.2.6.	Zona de Riesgo 10 (Caliza con pendiente de $> 15^\circ$)	92
5.2.6.1.	Riesgo	92
5.2.6.2.	Recomendaciones	92
5.2.7.	Zona de Riesgo 11 (Arroyos)	93
5.2.7.1.	Riesgo	93
5.2.7.2.	Recomendaciones	93
5.2.8.	Otras conclusiones	94
Bibliografía		95

Lista de figuras

1.1. Daños ocasionados por huracán Alex en el año 2010.	3
1.2. Localización del área de estudio (tomado de Google Earth).	4
1.3. Los recuadros muestran zonas donde se han realizado mapeos de riesgo; las zonas marcadas con asteriscos corresponden a diversos estudios puntuales de ingeniería geológica y el polígono punteado corresponde a la zona de estudio.	5
1.4. Delimitación de área urbana dentro de la zona de estudio	7
1.5. Histograma relacionado a la precipitación promedio mensual y su desviación estándar en la estación meteorológica San Catarina, N.L. (Periodo Julio – Diciembre 1947 – 2008; Comisión Nacional del Agua, 2018).	11
2.1. Tabla estratigráfica del NE de México (Michalzik, 1988).	14
2.2. Curvatura o Saliente de Monterrey (tomado de Google Earth).	16
2.3. Litología presente en el área de estudio (modificado de Michalzik (1988)). .	17
2.4. Formación Cupido en la parte superior de la línea roja.	18
2.5. Afloramiento de estratos de caliza masiva de Formación Cupido en el área de estudio.	19
2.6. Afloramiento de Formación La Peña.	20
2.7. Rocas de la Formación Aurora con la presencia de nódulos de pedernal. . .	21
2.8. Rocas de la Formación Aurora con veta de calcita de 3.4 metros de espesor.	22
2.9. Estructura de explotación abandonada donde realizaba extracción de mineral en años anteriores.	23
2.10. Talud de la Formación Cuesta del Cura en el área de estudio.	24

2.11. Material de arrastre presente en la zona de estudio	25
2.12. Brechas sedimentarias de ladera cementada (coluvión cementado) presentes en la zona de estudio.	26
2.13. Material cuaternario junto a casa habitación	27
2.14. Áreas propuestas por Padilla y Sánchez et al. (1986) según su estilo de plegamiento para la Curvatura de Monterrey, las flechas en negro indican la dirección de <i>décollement</i> y el área de estudio está contenida en el área A, Cerro de las Mitras.	29
3.1. Metodología para realizar mapas de susceptibilidad y peligro (modificado de Ferrer (1991)).	33
3.2. Vista de oriente a poniente del Cerro de las Mitras desde la nariz SE. La zona de estudio se encuentra en la parte izquierda del parteaguas.	34
3.3. Mapa topográfico del área de estudio (Anexo I)	36
3.4. Mapa hidrológico que muestra algunas cañadas en azul que no alcanzan a conectarse con el río Santa Catarina. Imagen raster proporcionada por el INEGI (carta G14-C25)(Anexo II)	38
3.5. Mapa geológico del área de estudio. Se aprecian formaciones geológicas por encima de la cota 800, y por debajo de esta la mancha urbana ha cubierto afloramientos de manera extensiva, arroyos truncados en azul por la mancha urbana en celeste (Anexo III)	40
3.6. Tipos de movimientos de ladera, tomado de Brunetti (2014).	43
3.7. Antiguos movimientos en masa con presencia de bloques inestables, además de evidencia de explotación de caliza en abandono	44
3.8. Carta morfológica con seis rangos de pendiente del área de estudio (SEGOB, 2016) (Anexo IV).	52
3.9. Carta morfológico con tres rangos de pendiente (tipo semáforo) (Chapa Gue- rrero et al., 1994) (Anexo V).	53
3.10. Zonas de Riesgos Geológicos utilizando la metodología de SEGOB (2016) (Anexo VI).	55

3.11. Zonas de Riesgos Geológicos utilizando la metodología de Chapa Guerrero (1993) (Anexo VII).	56
4.1. Histogramas relacionados a la precipitación mensual en la estación meteorológica Santa Catarina, N.L. (Periodo Enero – Junio 1947 – 2008; Comisión Nacional del Agua, 2018).	61
4.2. Histogramas relacionados a la precipitación mensual en la estación meteorológica Santa Catarina, N.L. (Periodo Julio – Diciembre 1947 – 2008; Comisión Nacional del Agua, 2018).	62
4.3. Caídos de roca dentro de la cantera inactiva de la colonia Salvador Allende, Cerro del Topo Chico. Tomado de Montalvo-Arrieta et al. (2010).	69
4.4. Representación estereográfica del cono de fricción. El ángulo de fricción delimitado por la proyección del cono en el hemisferio. El punto A se encuentra dentro del círculo de fricción lo cual indica que se encontrara cinemáticamente estable guardando una inclinación menor a φ ; el punto B siendo más inclinado, su proyección en el hemisferio se encuentra fuera del círculo lo cual crearía condiciones de inestabilidad (tomado de Chapa Arce (2017)) .	71
4.5. Zonas de estabilidad a partir de un análisis cinemático	72
4.6. Rotura planar y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977) . .	73
4.7. Falla tipo planar y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977) .	74
4.8. Falla tipo cuña y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977) . .	75
4.9. Falla tipo cuña y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977) . .	76
4.10. Se puede observar la disposición de los estratos en un alto nivel de pendiente en su echado.	77
4.11. Estereograma de talud 1. Se muestran los diferentes elementos de acuerdo a los colores: Plano de Estratificación y su respectivo polo (línea en negro), plano de J1 y su respectivo polo (línea en verde), plano de J2 y su respectivo polo (línea en azul), plano de Talud y envolvente de falla (línea en rojo), planos de debilidad (línea en magenta), cono de fricción (línea en naranja) y en línea punteada el Círculo de Rozamiento.	79

4.12. Se puede observar un plano muy marcado. Este talud esta definido por el rumbo y buzamiento de la estratificación	80
4.13. Estereograma de talud 2. Se muestran los diferentes elementos de acuerdo a los colores: Plano de Estratificación y su respectivo polo (línea en negro), plano de J1 y su respectivo polo (línea en verde), plano de J2 y su respectivo polo (línea en azul), plano de Talud y envolvente de falla (línea en rojo), planos de debilidad (línea en magenta), cono de fricción (línea en naranja) y en línea punteada el Círculo de Rozamiento.	81
4.14. Se puede observar la disposición de los estratos en un alto nivel de pendiente en su echado.	83
4.15. Estereograma de talud 3. Se muestran los diferentes elementos de acuerdo a los colores: Plano de Estratificación y su respectivo polo (línea en negro), plano de J1 y su respectivo polo (línea en verde), plano de J2 y su respectivo polo (línea en azul), plano de Talud y envolvente de falla (línea en rojo), planos de debilidad (línea en magenta), cono de fricción (línea en naranja) y en línea punteada el Círculo de Rozamiento.	84
5.1. Distancia para zona de seguridad en márgenes de arroyo amplio	93
5.2. Distancia para zona de seguridad en márgenes de arroyo cerrado	94

Lista de tablas

3.1. Tipos de mapas y su contenido modificado de González de Vallejo et al. (2002).	32
3.2. Documentación por km ² (Reuter et al., 1978).	47
3.3. Pendiente según grados inclinación (Chapa Guerrero et al., 1994).	51
3.4. Pendiente según grados de inclinación (SEGOB, 2016).	51
4.1. Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas, tomado de González de Vallejo et al. (2002).	59
4.2. Parámetros de clasificación de RMR (Bieniawski and Bieniawski, 1989). . .	65
4.3. Índice de calidad (Rock Mass Rating), tomado de Chapa Arce (2017). . .	66
4.4. Clasificación del RMR para la Formación Aurora.	67
4.5. Clasificación del RMR para la Formación Cuesta del Cura.	68

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Los procesos geológicos que actúan en la parte superficial de la Tierra, dan origen a diversos movimientos de terreno de distintas escalas y características, los cuales pueden producir Riesgos Geológicos al afectar de forma directa o indirecta a la población humana.

Los Riesgos Geológicos pueden causar cifras elevadas, tanto de víctimas, como de pérdidas económicas. Es por eso, que el conocimiento de las causas que originan los riesgos geológicos y sus efectos en una cierta región, ayuda en la planificación de nuevas zonas poblacionales, así como visualizar más claramente las estrategias de mitigación y control de las zonas en riesgo. Esta forma de planeación y prevención es de vital importancia para el crecimiento adecuado de cualquier ciudad y el bienestar civil.

1.2 Problemática

En los últimos años la población mundial ha crecido de una forma acelerada, en la década de los 50's del siglo pasado se contaba con una población total de 2,600 millones de personas. Entre los años 1990 y 2000 se alcanzaron los 6,000 millones de habitantes globales y en un lapso de 12 años, a finales del año 2011, la población mundial llegó a los 7,000 millones de habitantes (ONU-Población) esto quiere decir que la población dio un

salto de 1,000 millones de habitantes.

Para México el crecimiento poblacional, igual que a nivel mundial, no ha sido la excepción. Esto trae como consecuencia la movilidad de una gran población hacia lugares donde se tenga mejor oportunidad de vida. Esta movilidad de personas pretende encontrar zonas que cuenten con la mayor cantidad de servicios urbanos y ofrezcan más comodidades, desarrollándose así las grandes áreas o urbes poblacionales, demandando cada día nuevas zonas urbanas, lo que hace que su crecimiento sea exponencial.

En el presente trabajo se plasma un estudio sobre la problemática geológica y sus riesgos en una zona urbana localizada en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). Esta urbe poblacional es una de las tres principales ciudades del país y una de las económicamente con mejores perspectivas, por lo que se ha convertido en una de las ciudades objetivo para las personas que buscan mejorar su calidad de vida dentro de México. Sin embargo, en México, al igual que en otros países en vías de desarrollo, la planeación urbana no es la mejor que existe, ya que no se cumplen con los parámetros establecidos en los diferentes organismos existentes, lo que conlleva a un aglutinamiento poblacional como es el caso de estudio. En este caso existe una alta densidad poblacional por km^2 , lo que ha repercutido en el desarrollo urbano, sumándose que la densidad de población se ha incrementado en zonas de pendientes elevadas donde se puedan presentar procesos geológicos que ponen en riesgo la seguridad física de las personas. El AMM es una zona enclavada en el pie de monte de la Sierra Madre Oriental (SMO). Dentro de la mancha urbana existen varios altos topográficos (Cerro de la Silla, Cerro del Topo Chico, Cerro de la Loma Larga, Cerro de las Mitras), sobre los cuales, a través de los años, por diversos motivos sociales y políticos la población se ha establecido en las laderas de estas elevaciones.

Los asentamientos han estado poco regulados durante muchos años y se ha pasado por alto la problemática geológica – geotécnica existente, ya que dichos asentamientos se ubican en lugares con pendientes muy escarpadas, sobre sistemas naturales de drenaje o taludes inestables. De igual manera, las laderas generan diferentes tipos de movimientos

1.2. PROBLEMÁTICA

en masa, en forma natural, lo que representa un peligro para la población.

La población de Santa Catarina, específicamente situada en lugares como los anteriormente descritos, ha sido afectada en su patrimonio por movimientos en masa ocasionados por diferentes factores, siendo el más frecuente, los eventos extraordinarios de lluvia, clasificadas como trombas, tormentas tropicales o huracanes, que han golpeado el AMM (Figura 1.1).



Figura 1.1. Daños ocasionados por huracán Alex en el año 2010.

En este estudio se planea llevar un historial de los eventos ocurridos en la región del flanco sur del Cerro de las Mitras, en el área comprendida del municipio de Santa Catarina, Nuevo León, así como la actualización de estudios realizados con anterioridad y la obtención de información inédita en zonas no documentadas.

1.3 Localización

El Municipio de Santa Catarina se localiza entre los paralelos $25^{\circ}25'$ y $25^{\circ}45'$ de latitud norte y los meridianos $100^{\circ}14'$ y $100^{\circ}46'$ de longitud oeste, a una altitud entre los 600 y 3,300 m.s.n.m., colinda al norte con los municipios de García y Monterrey; al este con los municipios de San Pedro Garza García, Monterrey y Santiago; al sur con los municipios de Santiago y el estado de Coahuila; al oeste con el estado de Coahuila y el municipio de Zaragoza, Nuevo León.

EL cerro de las Mitras es una elevación montañosa (Figura 1.2), que se localiza entre los municipios de Monterrey, García, San Pedro Garza García y Santa Catarina, todos ellos pertenecientes al AMM. El área de estudio se encuentra en su mayoría en el municipio de Santa Catarina.

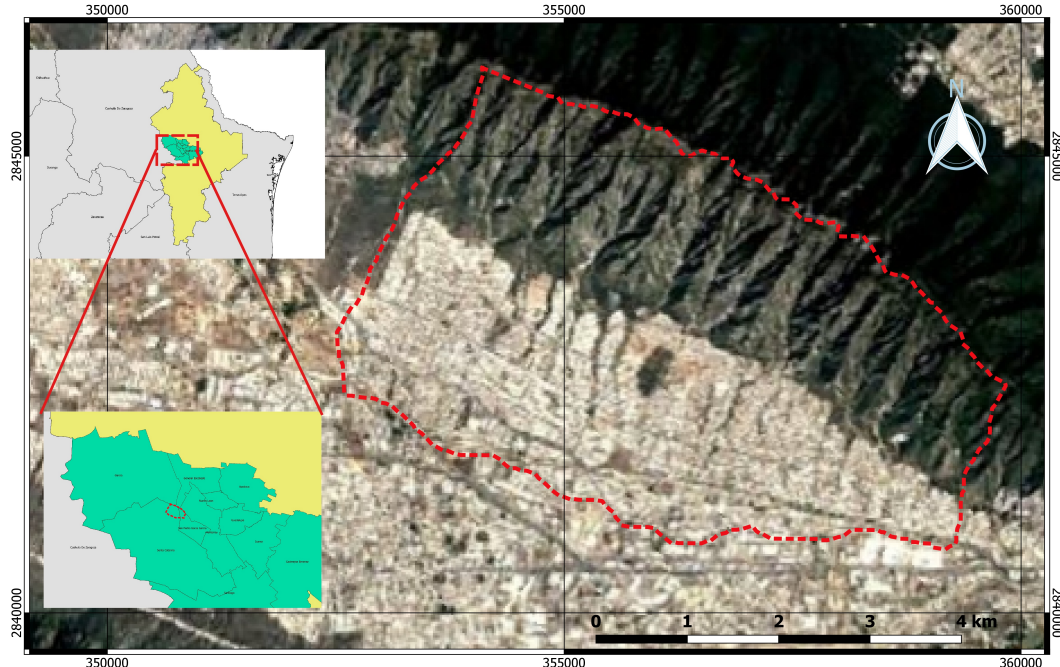


Figura 1.2. Localización del área de estudio (tomado de Google Earth).

1.4 Antecedentes

Al ser el AMM una de las regiones más pobladas del país y por encontrarse en una zona con diversos altos topográficos, dentro de esta se han realizado diversos estudios, tanto de carácter geológico como de ingeniería geológica, que han ayudado a entender las diversas estructuras geológicas presentes en el área para delimitar aspectos ingenieriles y de riesgos (Figura 1.3).

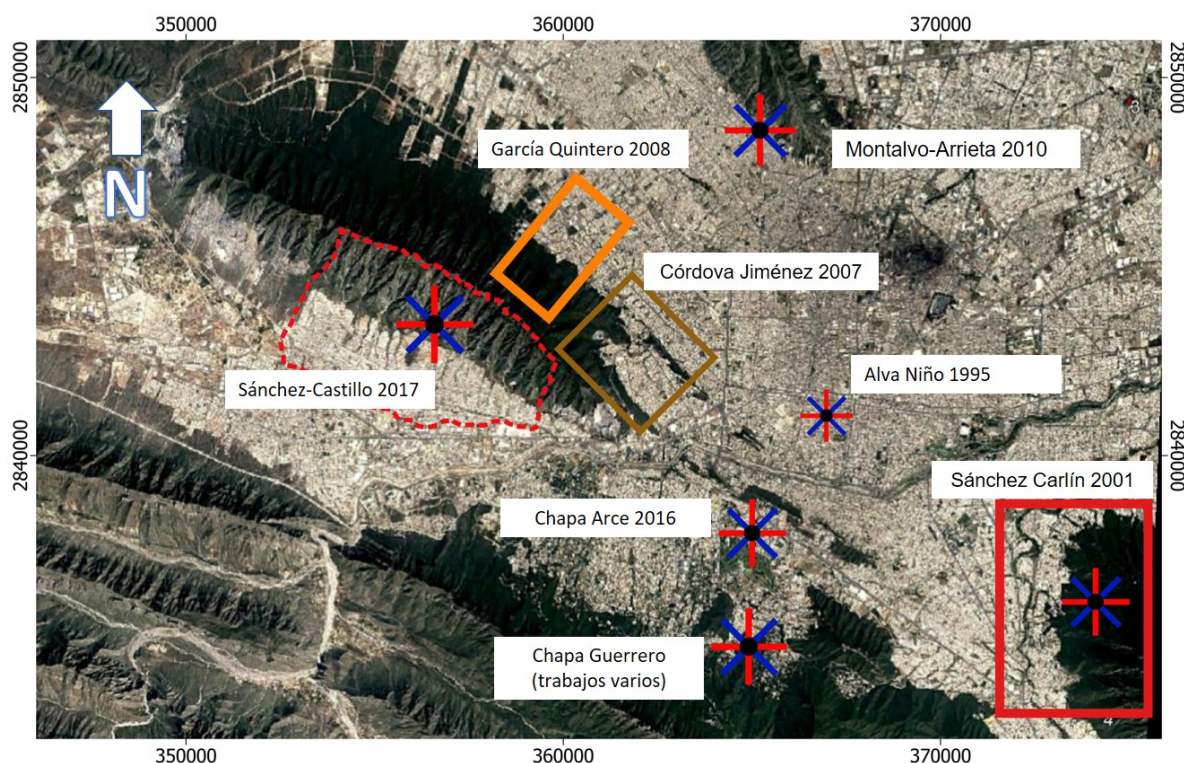


Figura 1.3. Los recuadros muestran zonas donde se han realizado mapeos de riesgo; las zonas marcadas con asteriscos corresponden a diversos estudios puntuales de ingeniería geológica y el polígono punteado corresponde a la zona de estudio.

- **Padilla y Sánchez (1985)** realizó estudios geológicos sobre la Curvatura de Monterrey.
- **Chapa Guerrero (varios)** realizó los primeros estudios de riesgos geológicos dentro

del Área Metropolitana de Monterrey (San Pedro Garza García, área de Chipinque), bajo un análisis geológico, tectónico, morfológico del anticlinal de Los Muertos.

- **Hernández Padilla (1994)** realizó su tesis de licenciatura con investigaciones geológicas e hidrogeológicas del AMM, e igualmente **Alva Niño (1995)** elaboró su tesis de licenciatura sobre datos base y metodología para la elaboración de una carta ingeniero-geológica del Área Metropolitana de Monterrey, N.L.
- **Lozano (2004)** llevó acabo una evaluación de riesgos hidrometeorológicos y geológicos en Monterrey.
- **Córdova Jiménez (2007)** realizó su tesis de licenciatura elaborando una Carta Diagnóstica de riesgos geológicos en la parte sureste del Cerro de las Mitras.
- **García Quintero (2008)** aplicó la metodología sobre Riesgos Geológicos en el flanco Nornoroeste del Cerro de las Mitras.
- **Chapa Guerrero *et al.* (2010)** publicaron sobre la importancia de estudios geológicos, hidrogeológicos y morfológicos para planificación urbana sobre riesgos geológicos.
- **Montalvo-Arrieta *et al.* (2010)** publica sobre Causas y efectos de Movimientos en Masa en el Área Metropolitana de Monterrey, NE de México.
- **Sanchez-Castillo *et al.* (2017)** publicaron sobre el método de probabilidad de desastres por sedimentos a causa de lluvia en la SMO.
- **Chapa Arce (2016)** realizó una tesis de maestría sobre el análisis de estabilidad de taludes rocosos en la zona poniente de Monterrey, en el Cerro de las Mitras y el Cerro de la Loma Larga.

1.5 Justificación e Hipótesis

1.5.1 Justificación

La ciudad de Santa Catarina contaba en el año 2015 con una población de 285,543 habitantes según INEGI; de igual forma, el Plan Municipal de Desarrollo Urbano prevé un incremento de 55,899, en un escenario moderado, basado en el Consejo Nacional de Población, en su proyección 2010 – 2030, lo que daría una población de 341,442 habitantes.

La mancha urbana dentro del área de estudio ha avanzado de forma progresiva y desordenada, pendiente arriba, en zonas de ladera del Cerro de las Mitras desde los años ochenta, dándose una explosión demográfica en la década de los 2000 (Figura 1.4).

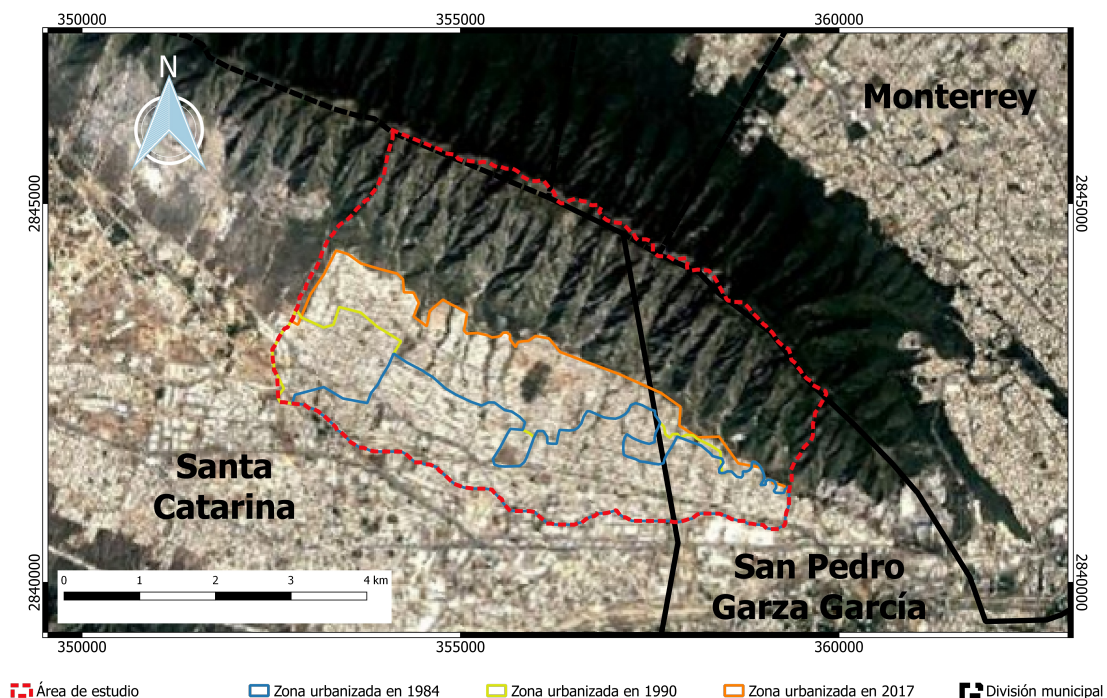


Figura 1.4. Delimitación de área urbana dentro de la zona de estudio

Desde el punto de vista geológico – geomorfológico, se considera prioritario realizar un análisis de riesgos en dichas áreas, con el fin de mantener la seguridad de la población y reducir los riesgos geológicos.

1.5.2 Hipótesis

Con base en un estudio cartográfico a diferentes escalas se podrá tener una mejor resolución de los factores condicionantes (morfología, geología y geología estructural) y sumando estos a los factores desencadenantes (lluvias torrenciales, sismicidad) de la región, para establecer en el área de estudio diferentes Zonas de Riesgos Geológicos.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Obtener cartas 1:10,000 que permitan identificar Riesgos Geológicos mediante la caracterización y estudio de zonas homogéneas y cortes de talud, de acuerdo a parámetros topográficos, geológicos – geomecánicos e hidrológicos, que ayuden para una mejor planificación de los asentamientos civiles, así como métodos de mitigación en caso de existir riesgo, en el flanco sur del Cerro de las Mitras.

1.6.2 Objetivos Particulares

Para la cumplimiento del objetivo general fue importante la realización de algunos objetivos particulares, ya que esto permitió un mejor entendimiento de la zona de estudio, en un marco morfológico, geológico - geotécnico.

Los objetivos particulares se nombran a continuación:

- Realizar una carta geológica el área a escala 1:25,000 (aproximadamente 10 km²),
- Marcar zonas homogéneas basados en aspectos geológicos - geomecánicos,

- Identificar zonas anteriormente afectadas por algún tipo de evento geológico y definir su mecanismo detonante,
- Definir las áreas más vulnerables de la zona de estudio en una carta geológica de susceptibilidad, determinando los posibles efectos y afectaciones a la población y,
- Crear una base de datos que permita monitorear la zona de estudio y su regulación para futuros asentamientos civiles, así como concientizar a la población sobre los riesgos que conllevan los asentamientos humanos en zonas similares.

1.7 Metodología

La realización del presente trabajo se llevó a cabo en diferentes etapas, las cuales fueron:

1.7.1 Trabajo bibliográfico

Como todo trabajo de investigación, se realizó una recopilación bibliográfica de distintos artículos que hablan de la zona de estudio, tanto de manera técnica, los trabajos de investigación geológica, geotécnica, hidrogeológica y meteorológica, como lo son las cartas topográficas y geológicas de los diferentes organismos gubernamentales (Servicio Geológico Mexicano y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Así como, tesis realizadas en diferentes instituciones educativas y artículos de investigación en diferentes revistas. Además de diversos medios de información acerca de eventos relacionados con los Riesgos Geológicos que hayan impactado a la región estudiada a lo largo del tiempo.

1.7.2 Trabajo de campo

Esta etapa del estudio se caracterizó por la realización de una cartografía geológica de un área aproximada a 10 km² a una escala 1:25,000, con la obtención de datos estructurales (estratificación, diaclasas) y geomecánicos según la metodología de Reuter (1978), la cual establece una relación de los puntos a documentar de modo geológico y geotécnico de

acuerdo a cada kilómetro cuadrado dentro del área a ser investigada.

1.7.3 Trabajo de gabinete

La etapa final consistió en análisis de los datos obtenidos en campo y la elaboración de las cartas morfológicas bajo dos clasificaciones diferentes: SEGOB (2016) y Chapa Guerrero (1993); y las cartas geológicas, de susceptibilidad y riesgo, en donde se identificaron y describieron las diferentes Zonas de Riesgos Geológicos, además del análisis de algunos taludes presentes en el área de estudio para posteriormente dar paso a las conclusiones y recomendaciones para estas.

1.8 Clima y vegetación

El clima de la zona es en su mayor parte estepario semi-seco y la época de lluvias ocurre entre mayo y octubre. La mitad norte del territorio del estado de Nuevo León, donde se encuentra el área de estudio, tiene un clima estepario con veranos muy cálidos e inviernos templados a fríos, presentándose heladas con frecuencia en el invierno y ocasionalmente nieve.

En cuanto a la vegetación, el Cerro de la Mitras se compone de matorral sub-montano, bosque de encino, bosque de pino.

La importancia del clima y la vegetación para este estudio radica en que estos son un indicador de la acción de factores desencadenantes en la zona. Uno de estos factores es la precipitación cuyo promedio en un año es de 300 a 600 mm en la zona (Figura 1.5).

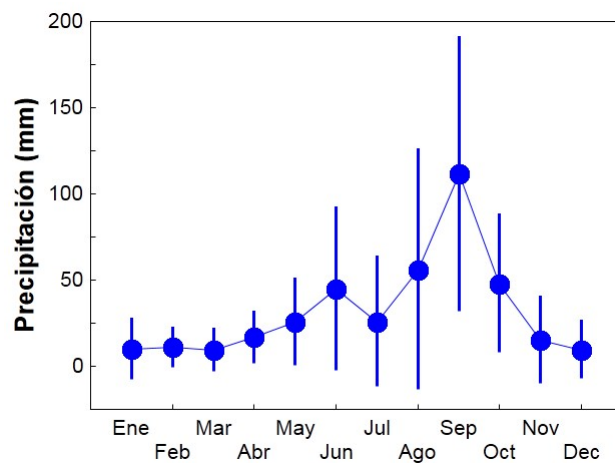


Figura 1.5. Histograma relacionado a la precipitación promedio mensual y su desviación estándar en la estación meteorológica San Catarina, N.L. (Periodo Julio – Diciembre 1947 – 2008; Comisión Nacional del Agua, 2018).

Capítulo 2

Geología

2.1 Introducción

Las ciencias son esenciales en la sociedad, pues con su aplicación y desarrollo pueden resolverse una cantidad importante de problemas para mejorar la calidad de vida del ser humano. Con esta idea, las ciencias de la Tierra que estudian la evolución y dinámica terrestre, son fundamentales para el entendimiento del entorno físico en el cual se establece una sociedad.

Así mismo, la geología mediante algunas de sus ramas como la ingeniería geológica, es un apoyo fundamental para la comprensión y el análisis de los procesos generados por diferentes fenómenos naturales que pudieran actuar en un sitio. Por lo cual, conocer y entender el marco geológico, desde lo general hasta lo particular, de donde se establecerá o se sitúa una población es de vital importancia, ya que con ello se pueden realizar diferentes análisis de riesgos geológicos y por ende una planificación para su manejo o mitigación.

En la ingeniería geológica se clasifican los materiales y se agrupan de acuerdo a la semejanza de condiciones y propiedades de estos, basándose en cuestiones físicas, morfológicas, geodinámicas, estratigráficas, hidrogeológicas, y demás criterios que pudieran generar un cambio, alteración de su estado de estabilidad o condición natural. De acuerdo a esto se generan diversos estudios y trabajos como los son las cartas de riesgos geológicos (mapas),

siendo en escalas diversas según su propósito.

Para realizar un análisis de riesgos geológicos es de suma importancia realizar un enlace entre la geología regional, local, contexto estructural (aspectos predominantes), del macizo rocoso y de los suelos presentes en el área de estudio, ya que de esta forma se podrá visualizar de una mejor manera la configuración del sitio, permitiendo aislar los agentes detonantes de los riesgos para su estudio particular y realizar un mejor estudio de análisis de riesgos.

Así como el planeta es dinámico, la sociedad también lo es, por lo que los centros urbanos están en constante cambio. Como se enfatizó en el capítulo anterior, el Área Metropolitana de Monterrey ha tenido un cambio significativo en las últimas décadas habitando zonas donde la ocurrencia de procesos geológicos como la erosión y transporte de detritos, está presente como lo son los Procesos de Remoción y Transporte de Masas, por lo que tener un buen estudio sobre la configuración geológica, sus fuerzas actuantes y agentes condicionantes del área, son fundamentales para la proyección a futuro de la ciudad.

2.2 Geología Regional

La Sierra Madre Oriental (SMO) es una cadena orográfica de pliegues y cabalgaduras que se extiende de Parral Chihuahua hasta Zongolia, Veracruz y cuenta con una amplitud de entre 80 y 100 km. La SMO es una de las provincias fisiográficas que conforman el territorio mexicano y se sitúa al noreste - este del país, siendo cortada y cubierta por rocas volcánicas del Mioceno Reciente del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) para reaparecer y extenderse al sureste en Veracruz. Además de estar cubierta por rocas del CVM, al noroeste también está cubierta por rocas volcánicas félsicas de la Sierra Madre Occidental (SMOcc), al noreste con la Gran Llanura de Norteamérica, al este con la Llanura Costera del Golfo y al oeste y sur con el Altiplano Mexicano.

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL

La SMO se eleva con cumbres que sobrepasan los 2,500 m sobre el nivel del mar, y se constituye, a la altura del Área Metropolitana de Monterrey, por un paquete sedimentario marino Jurásico - Cretácico (Figura 2.1), deformado durante el Cretácico Tardío-Paleógeno, dando lugar al cinturón de pliegues y cabalgaduras.

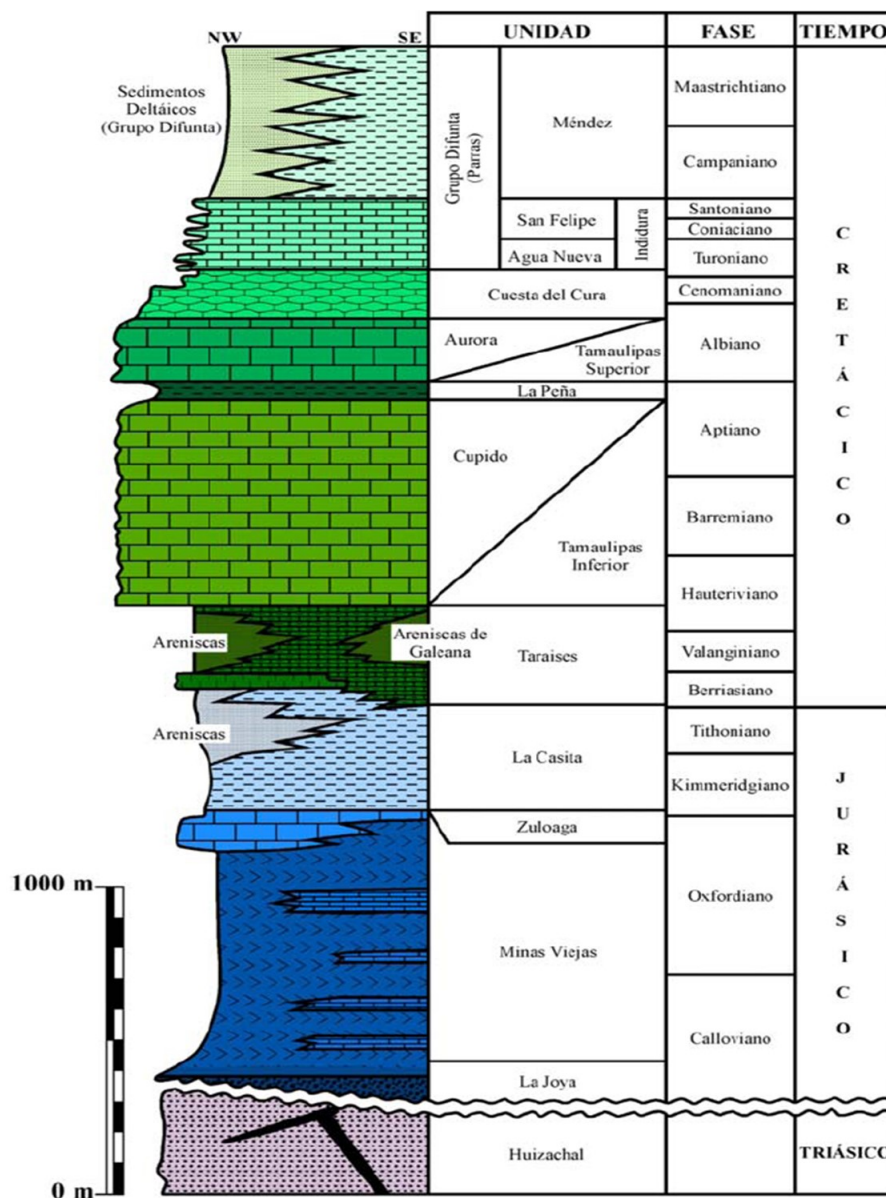


Figura 2.1. Tabla estratigráfica del NE de México (Michalzik, 1988).

La SMO está compuesta de rocas sedimentarias marinas clásticas y calcáreas del Mesozoico que sobreyacen a rocas del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico que integran el

basamento del NE de México (Padilla y Sánchez (1982), Wilson (1986), Goldhammer et al. (1991), Goldhammer and Johnson (1999), Chávez Cabello et al. (2011)).

El cinturón orogénico de la SMO fue levantado a causa de un *décollement* a nivel regional y el despegue de la secuencia marina del mesozoico superior, producto de esfuerzos transferidos durante la somerización del ángulo de subducción (Eguiluz De Antuñano et al. (2000); Chávez-Cabello (2005); Fitz-Díaz et al. (2018)). El cual también controló la migración del magmatismo de arco del oeste de México hacia la parte interna del continente entre los 80 y 40 Ma (Coney (1976), Coney and Reynolds (1977), Dickinson and Snyder (1978), Clark et al. (1981)), acelerando la regresión marina regional en el noreste de México. Estos pliegues de gran longitud y cabalgaduras caracterizan al sector Saliente de Monterrey que posee un estilo de deformación *thin-skinned* o de piel delgada más intenso que en otras zonas, debido a la presencia de una columna mucho mayor de evaporitas (Padilla y Sánchez (1982), Padilla y Sánchez (1985), Eguiluz De Antuñano et al. (2000)).

Es importante destacar que la SMO hace una flexión en Monterrey, precisamente en el área de estudio, conocida como curvatura de Monterrey (Padilla y Sánchez (1982), Chávez-Cabello et al. (2004)) (Figura 2.2).

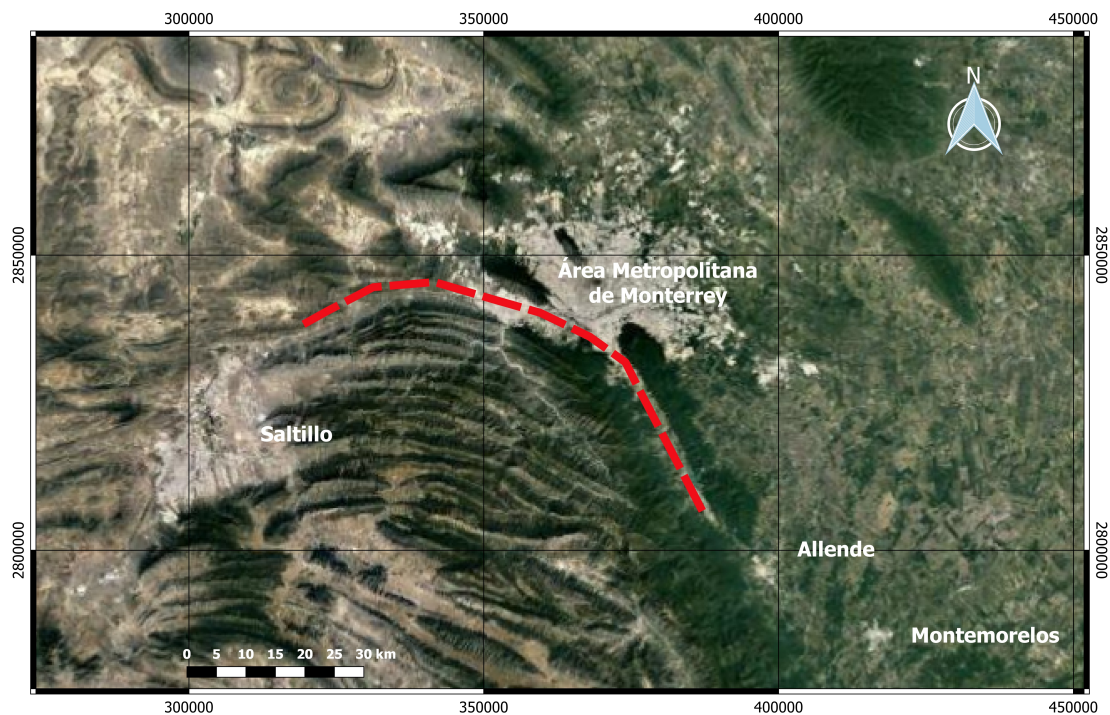


Figura 2.2. Curvatura o Saliente de Monterrey (tomado de Google Earth).

Para el área de la Curvatura de Monterrey, Padilla y Sánchez (1982) interpreta que las fuerzas compresivas actuaron en dirección Noreste, en combinación con una zona de *décollement* (Formación Minas Viejas), causando que los sedimentos se deslizaran y colisionaran contra áreas de basamento somero que, por su geometría y distribución, configuraron la estructura de la Saliente de Monterrey.

2.3 Geología Local

La Sierra Madre Oriental está conformada por una secuencia de rocas sedimentarias marinas, que definen diferentes unidades litológicas del Mesozoico, variando en edad del Jurásico Tardío al Cretácico Tardío. Las rocas del Jurásico Tardío corresponden a sedimentos evaporíticos y carbonatos de agua poco profundos, arcillas y depósitos clásticos, calizas de aguas someras y arcillas del Cretácico Inferior que en su unidad superior corresponden a lutitas y rocas clásticas.

2.3. GEOLOGÍA LOCAL

Dentro del área de estudio del Cerro de las Mitras se encuentran rocas sedimentarias que corresponden a edades del Cretácico Inferior a Superior, entre las cuales se pueden mencionar las formaciones: Cupido, La Peña, Aurora, Cuesta del Cura y Agua Nueva, así como una secuencia de material poco o no consolidado pertenecientes a edades más jóvenes (Figura 2.3). Fuera del área de estudio pero aún en las periferias al Cerro de las Mitras afloran también as formaciones San Felipe y Méndez.

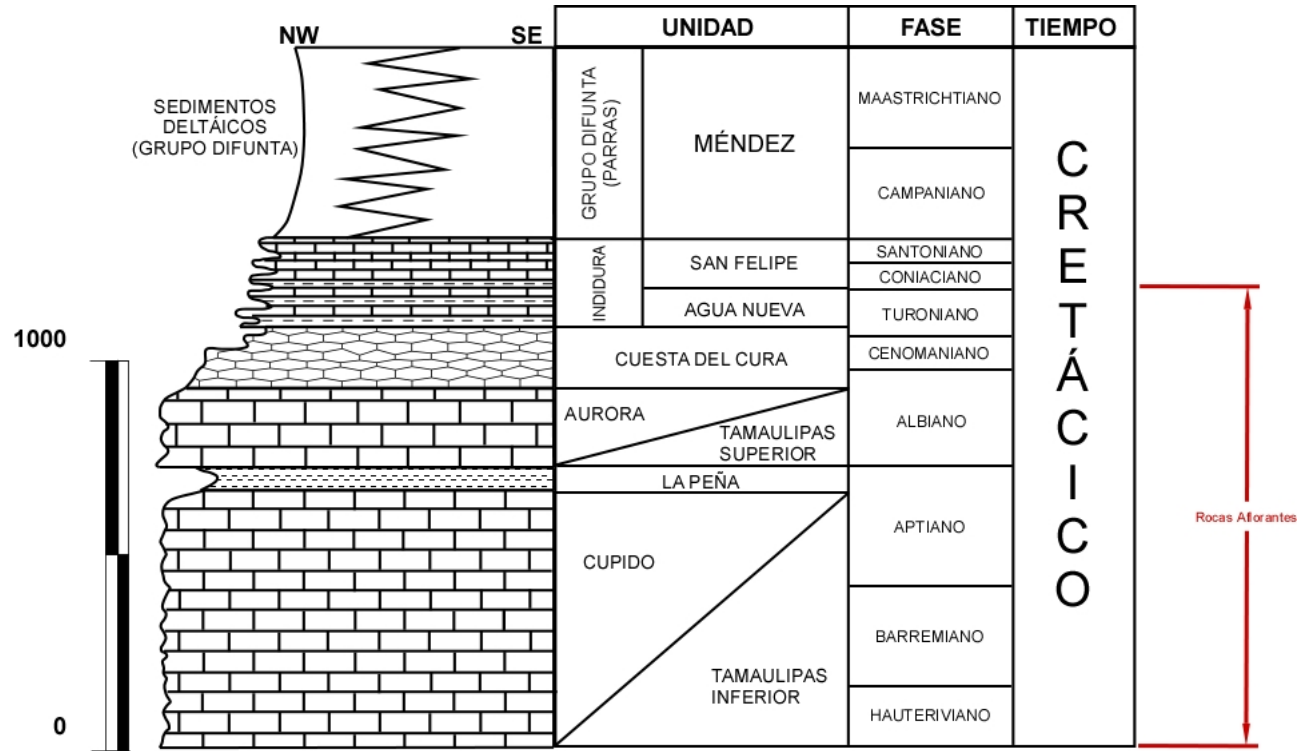


Figura 2.3. Litología presente en el área de estudio (modificado de Michalzik (1988)).

A continuación se presenta una descripción de las formaciones litológicas que afloran en el área en el que se realiza el estudio.

2.3.1 Cretácico

2.3.1.1 Formación Cupido

Imlay (1937) la describió como una formación de capas gruesas, medianas y delgadas

de caliza gris, siendo predominantes la caliza de capas medianas. Esta Formación cuenta con una edad que data del Hauteriviano superior al Barremiano. La Formación Cupido es abrupta con la Formación La Peña que le sobreyace, el contacto se distingue donde la caliza llega ser delgada y abundante. El contacto con la lutita y caliza margosa de la Formación La Peña es abrupto y concordante.

De las formaciones que afloran en el área de estudio esta es la formación más antigua, los estratos de esta formación se encuentran coronando el anticlinal de Las Mitras, son las rocas que presentan mayor resistencia a la meteorización (Figura 2.4).



Figura 2.4. Formación Cupido en la parte superior de la línea roja.

Descripción La formación Cupido aflora en el área de estudio estando representada por calizas de color gris claro en su estado intemperizado (Figura 2.5) y de un color gris más oscuro en muestra fresca, sus estratos varían de tamaño desde unos cuantos centímetros (aproximadamente 30 cm) a unos metros.

En lo que se refiere a contenido de fauna (paleontológico), en esta formación se encuentra gran cantidad de bioclástones de gasterópodos y rudistas.



Figura 2.5. Afloramiento de estratos de caliza masiva de Formación Cupido en el área de estudio.

2.3.1.2 Formación La Peña

Humphrey (1949) hace mención que la unidad está constituida por marga de color gris que intemperiza en colores rosa y rojo, interestratificadas con delgadas capas de caliza de color gris claro a gris oscuro. Presenta estratos delgados de lutita fisil de color gris oscuro a negro y comúnmente contiene vetillas y lentes de pedernal de 3 a 9 cm de espesor. Esta unidad tiene una edad del Aptiano superior.

Descripción La Formación La Peña cuenta con un espesor de aproximadamente 30 metros dentro del área de estudio. Esta separa a las formaciones Cupido y Aurora, y se caracteriza por intercalaciones de capas de caliza de color gris y capas delgadas de lutitas de color rojizo en estado intemperizado (Figura 2.6).



Figura 2.6. Afloramiento de Formación La Peña.

2.3.1.3 Formación Aurora

La Formación Aurora fue descrita originalmente por Humphrey y Díaz (1956) como caliza con una estratificación delgada a masiva de color gris a ocre con cantidad variable de pedernal en forma de nódulos irregulares y concreciones. Presenta raras intercalaciones de lutita calcárea gris. Los nódulos de pedernal son de color gris a negro e intemperizan a ocre oscuro. La edad de esta unidad es Albiano Inferior al Superior, esto asignado por su contenido paleontológico (Figura 2.7).

Descripción Esta unidad se compone de caliza gris clara en estado intemperizado con espesores medianos a masivos, en algunos puntos se pueden observar nódulos de pedernal, así como vetillas de calcita, las cuales van desde algunos centímetros hasta varios metros

de espesor (Figura 2.8). Dentro del área de estudio existen canteras que se encuentran en abandono o inactivas. Éstas eran aprovechadas para el proceso de elaboración de cemento (Figura 2.9).



Figura 2.7. Rocas de la Formación Aurora con la presencia de nódulos de pedernal.



Figura 2.8. Rocas de la Formación Aurora con veta de calcita de 3.4 metros de espesor.



Figura 2.9. Estructura de explotación abandonada donde realizaba extracción de mineral en años anteriores.

2.3.1.4 Formación Cuesta del Cura

De acuerdo con Imlay (1936), esta formación se constituye por aproximadamente 80 m de caliza de estratificación delgada y ondulosa, conteniendo lentes, capas y nódulos de pedernal oscuro. La edad de esta Formación ha sido establecida en Albiano Superior – Cenomaniano Inferior (Figura 2.10).

Existen algunos taludes en el área que se conforman de macizos rocosos de esta formación y en algunos puntos cercanos a estos puede verse el límite con la Formación Aurora.



Figura 2.10. Talud de la Formación Cuesta del Cura en el área de estudio.

2.3.1.5 Formación Agua Nueva

Stephenson (1922, en Muir 1936) describe que la Formación Agua Nueva en su localidad tipo, consiste de 200 a 300 pies de caliza con delgados horizontes de pedernal en su base, intercalados con lutita carbonosa negra que contienen abundantes *Inoceramus labiatus*. De manera general, la edad que se le ha asignado a esta unidad es Turoniano (Carrillo-Bravo, 1971; Ontiveros-Tarango, 1973; López-Ramos, 1979).

Descripción Dentro del área de estudio se encuentran pocos afloramientos de esta formación, siendo una de las formaciones cubiertas discordantemente por material del cuaternario. Esta formación consiste en margas con espesores delgados interclados con lutita

ocre en color de intemperizmo y color negro por su contenido bituminoso en afloramientos frescos.

2.3.2 Cenozoico

2.3.2.1 Cuaternario

En el área de estudio se pueden apreciar cuatro tipos esenciales de sedimentos no cementados (Figura 2.11) (Chapa Guerrero, 1993):



Figura 2.11. Material de arrastre presente en la zona de estudio

Coluvión: Son depósitos producto de la fracturación de las rocas desplazadas por gravedad sin recorrer grandes distancias. Se presentan en forma de bloques de tamaños mayores a 30 cm hasta varios metros de diámetro, predominando estas mismas en las zonas altas del escarpe natural de la sierra. Entre los depósitos se pueden destacar aquí bloques de las formaciones Cupido y Aurora (Figura 2.12).

Derrubio: Son depósitos producto de la fracturación de la roca desplazados por gravedad y por los flujos torrenciales que suelen presentarse en el área de estudio. La clasificación

granulométrica es muy irregular, de tipo caótico. Aquí se presentan fragmentos de todas las formaciones.

Proluvión: Se trata de depósitos producto de la fragmentación de la roca desplazados únicamente por la fuerza de los flujos torrenciales. Se puede decir que esta unidad presenta una clasificación granulométrica buena. Aquí se presentan fragmentos de todas las formaciones principalmente depositados sobre los cauces de arroyos salvajes.

Aluvión: Son depósitos fluviales relacionados con el transporte de ríos. Aquí se presentan sedimentos de todas las formaciones, este tipo de depósitos no se presentan en el área de estudio.



Figura 2.12. Brechas sedimentarias de ladera cementada (coluvión cementado) presentes en la zona de estudio.



Figura 2.13. Material cuaternario junto a casa habitación

La zona de estudio se encuentra en una zona de ladera, por lo que este tipo de material es típico, ya que es producto de la disgregación de las rocas de los diferentes afloramientos que se encuentran en la localidad. Sobre esta unidad se encuentran edificadas la mayoría de las diferentes unidades habitacionales que se encuentran en la zona (Figura 2.13).

2.4 Geología Estructural

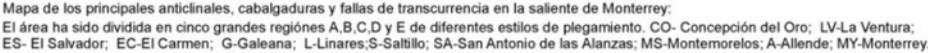
El AMM está ubicada entre montañas configuradas por pliegues anticlinales del frente tectónico de la SMO. En este complejo tectónico, definido como un cinturón de pliegues y cabalgaduras contextualiza desde un marco geológico - estructural el área de estudio dentro de la subprovincia denominada Saliente de Monterrey. Eguiluz De Antuñano et al. (2000) designa esta estructura, como un rasgo orográfico, formado por un macizo montañoso rugoso y alargado, situado en la parte NE de la República Mexicana.

La Curvatura de Monterrey se constituye de una estructura compuesta por pliegues de gran longitud y grandes cabalgamientos (Padilla y Sánchez, 1982). Contrastando así con el estilo de deformación localizado en Coahuila en el área de la Cuenca de Sabinas, a los de la Sierra Transversa de Parras y con los del Sur del estado de Tamaulipas y parte de

Nuevo León, en donde son menos extensos los pliegues, siendo más simétricos y lomeríos más suaves (Padilla y Sánchez et al., 1986).

Meiburg et al. (1987) describieron el estilo de deformación de la SMO como un basculamiento (inclinación $< 4^\circ$) de México de Oeste a Este durante el Paleoceno Superior, lo que causó el desprendimiento de la secuencia sedimentaria sobreyacente a la Formación Minas Viejas. Por otro lado, los altos topográficos (archipiélago de Tamaulipas y Península de Coahuila) fueron condicionantes del cambio de rumbo de las estructuras y el estilo de deformación de la Sierra Madre, delimitando así la Curvatura de Monterrey (Padilla y Sánchez, 1982).

Padilla y Sánchez et al. (1986) dividieron esta región en cinco diferentes áreas, según su estilo de plegamiento, para explicar mejor el complejo de sistema estructural de la Curvatura de Monterrey. Se puede apreciar que para el Cerro la Silla la dirección de *décollement* es de SW a NE y el Cerro de las Mitras guarda una dirección igual que el Cerro de la Silla de SSW a NNE, pero se aprecia notoriamente un cambio de dirección de *décollement* casi de Sur a Norte, a causa de la Curvatura que hace la SMO a la altura de Monterrey, N.L. Estas cinco diferentes áreas de la Curvatura de Monterrey se explican de forma breve a continuación (Figura 2.14):



Al comienzo de la deformación, las fracturas de cizalla $hk0$ con ángulo agudo respecto al eje a se producen antes que las fracturas de cizalla $hk0$ con ángulo agudo respecto al eje b (Hancock, 1985).

Las fracturas $hk0$ con ángulo agudo respecto al eje b se desarrollan después del comienzo del plegamiento. Mientras este proceso toma lugar, el pliegue presenta en su cresta una extensión en forma perpendicular al eje del mismo. Cuando el esfuerzo que origina esta extensión se vuelve más grande que el de compresión, se desarrollan estas fracturas, debido a la reorientación del campo de esfuerzos y al alto esfuerzo diferencial que se produce (Hancock (1985); Price and Cosgrove (1990)).

Las fracturas $hk0$ con ángulo agudo respecto al eje a , se forman con el esfuerzo que desarrolla el régimen tectónico de la Orogenia Sevier - Laramídica, y pueden ser utilizadas para conocer el rumbo del paleoesfuerzo que tuvo lugar en la zona (Peterson Rodríguez, 2001).

Capítulo 3

Cartografía

3.1 Introducción

De acuerdo a la Real Academia Española (RAE), el origen etimológico del término cartografía, que proviene del latín de la palabra *charta* “mapa o carta”, y el sufijo -grafía griego *graphein* “escribir”. La cartografía es la ciencia que se encarga del trazado y el estudio de mapas geográficos. Las cartas (mapas) son de vital importancia en la planeación de las ciudades, ya que estas son uno de los métodos más efectivos de presentar información de los sitios a trabajar o estudiar, de una manera ilustrada y ubicada en espacio.

La presencia y realización de cartas para el desarrollo de las ciudades es de vital importancia para una buena planeación y ejecución de las obras a futuro. Hoy en día es difícil imaginar alguna ciudad o poblado que no cuente con ellos, y con la aparición de servicios de libre acceso. Por ejemplo, los presentados por Google LLC como Google Maps e imágenes satelitales como GoogleEarth, facilita en cierta forma la tarea de saber en donde se está ubicado. Aún con estas herramientas, es importante para la sociedad que existan cartas detalladas en otras áreas de conocimiento, que permitan un mejor desenvolvimiento de esta presentando información relevante de una manera clara y concisa.

En este capítulo se analizarán los diferentes aspectos a tomar en cuenta para la elaboración de la zonificación del área de estudio, como lo son los aspectos: geomorfológicos,

3.1. INTRODUCCIÓN

geológicos y estructurales, así como los diferentes agentes desencadenantes y su interacción dentro de esta zona para la realización de los mapas de Riesgos Geológicos.

La preparación de los mapas de peligrosidad y riesgos tiene como objetivo diferenciar el área de estudio en zonas o unidades de acuerdo a su grado de peligro o riesgo. Para lograr este objetivo se realizan una serie de cartas que, de acuerdo a su contenido, enriquecen la información del área de estudio y permiten realizar otros tipo de cartas (Tabla 3.1 y Figura 3.1) .

Tipos de mapas	Contenido	Metodología
Inventario	Localización y distribución espacial de los procesos actuales y pasados y/o de las zonas afectadas. Características de los procesos (tipo, magnitud, velocidad, intensidad, etc.).	Recopilación de datos (documentos, mapas, foto aérea, campo). Estudio de la tipología y características de los procesos.
Susceptibilidad	Zonas con diferente grado de susceptibilidad frente a la ocurrencia de un tipo de proceso.	Análisis del proceso. Análisis de los factores condicionantes. Superposición de factores.
Peligrosidad	Zonas con diferente grado de peligrosidad.	Análisis de los factores desencadenantes. Predicción espacial y temporal de la ocurrencia de los procesos.
Vulnerabilidad	Localización espacial de los elementos o zonas con diferente grado de vulnerabilidad.	Identificación de los elementos expuestos. Evaluación de su vulnerabilidad.
Riesgo	Zonificación del territorio en base al riesgo o grado de riesgo.	Evaluación de pérdidas debidas a un proceso determinado.

Tabla 3.1. Tipos de mapas y su contenido modificado de González de Vallejo et al. (2002).

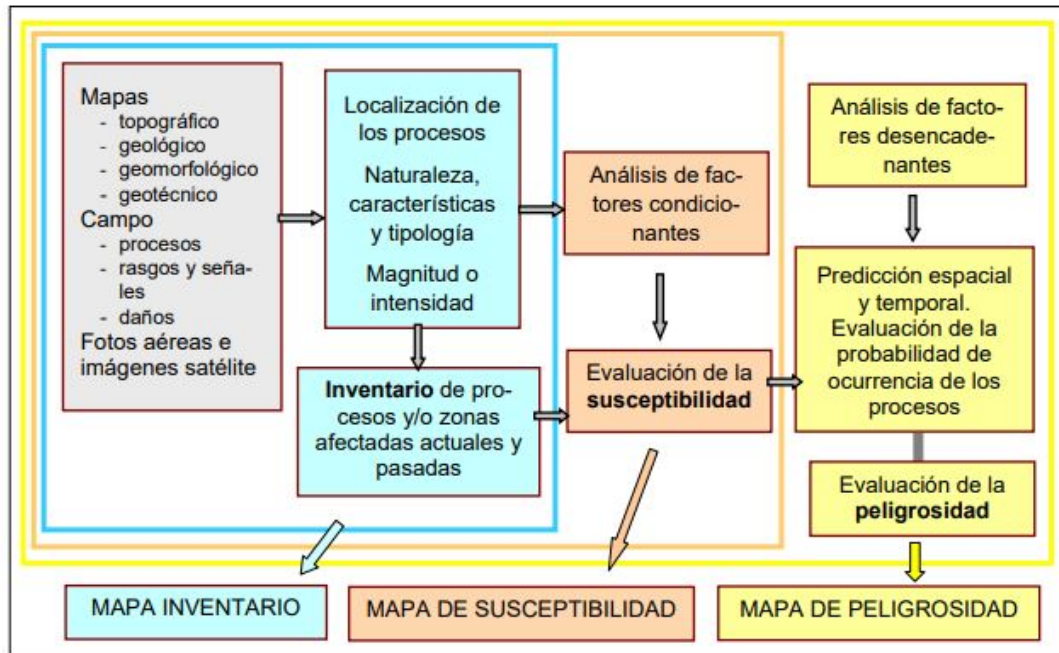


Figura 3.1. Metodología para realizar mapas de susceptibilidad y peligro (modificado de Ferrer (1991)).

3.2 Cartas Base

Siguiendo el criterio, descrito anteriormente, para la obtención de los distintos mapas a complementar el mapa de riesgos a continuación se muestran y describen los mapas base:

3.2.1 Carta Topográfica

Dentro del área de estudio existe un cambio topográfico muy marcado por ser parte de la falda del flanco sur del Cerro de las Mitras. Esta diferencia de alturas va desde los 620 msnm en su parte más baja, hasta los 2020 msnm en las partes más elevadas, siendo las cimas, las morfologías que le dan el nombre al cerro (Figura 3.3). Aquí se muestra el mapa topográfico del área de estudio con sus curvas de nivel, apreciándose que estas están mas juntas hacia lo alto del cerro (pendiente abrupta) y se amplían a medida que bajan (pendiente mas suave).

La diferencia de 1400 metros entre la parte más baja y la parte superior ocurre de manera abrupta en el área de estudio. Esto es debido a que, si bien la estructura del Cerro de Las Mitras es semi-domica, esta cuenta con cierta curvatura, en donde su punto de compresión es donde se encuentra la zona estudiada. Figura 3.2.



Figura 3.2. Vista de oriente a poniente del Cerro de las Mitras desde la nariz SE. La zona de estudio se encuentra en la parte izquierda del parteaguas.

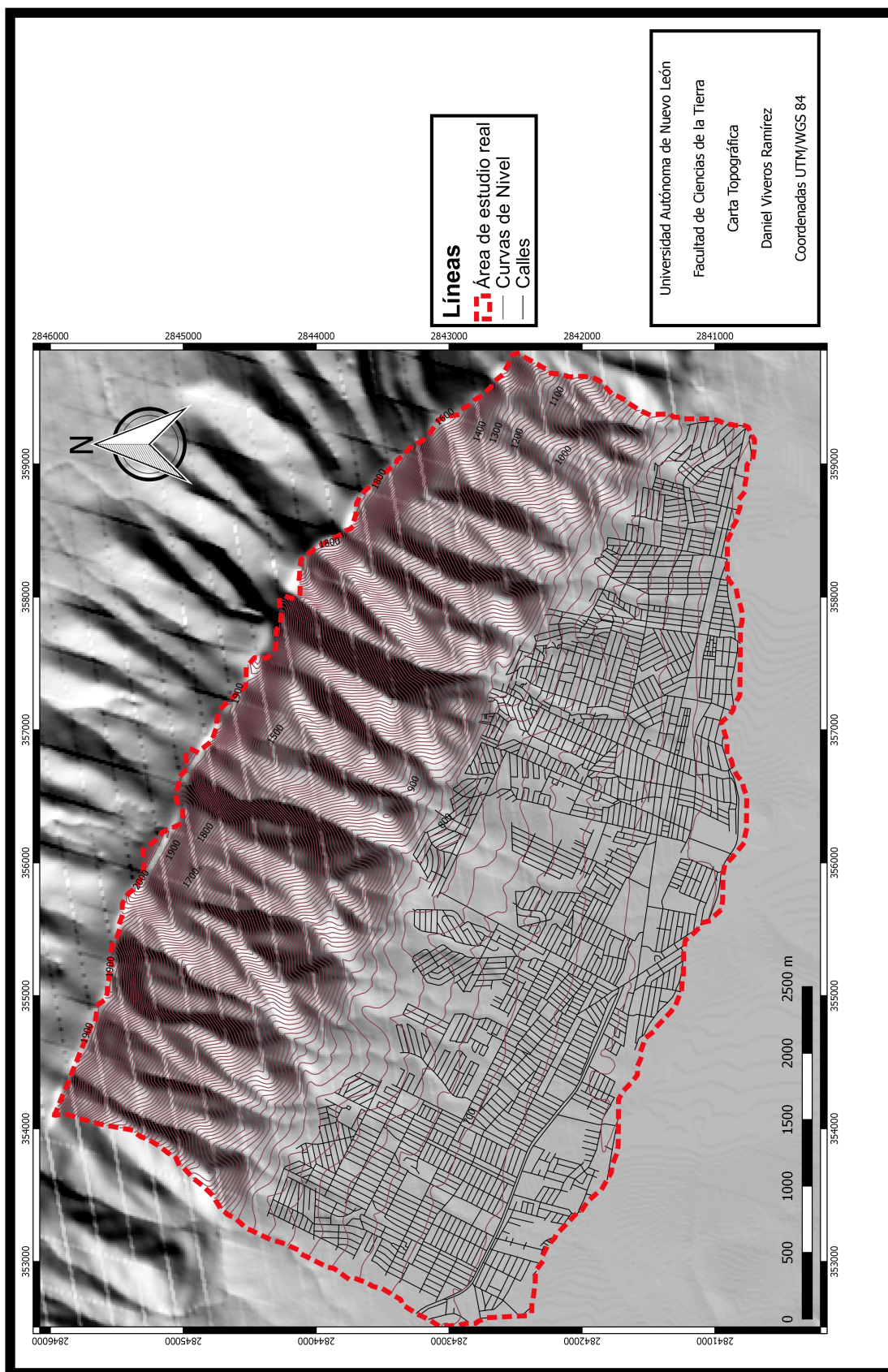


Figura 3.3. Mapa topográfico del área de estudio (Anexo I)

3.2.2 Carta hidrológica

El municipio de Santa Catarina tiene aproximadamente el 80 % de su territorio ocupado por el "Parque Nacional Cumbres de Monterrey", siendo este parte del frente de la SMO, el cual se encuentra al sur de la zona urbana del municipio. En la parte norte de la zona urbana se encuentra el Cerro de las Mitras (área de estudio). Esto nos indica que el municipio se encuentra dentro de un valle intramontañoso. Aquí se localiza uno de los principales ríos del estado de Nuevo León, el río Santa Catarina en honor al municipio.

El río Santa Catarina es el principal afluente de agua que atraviesa el AMM y nace dentro de lo que es conocido como "Parque Ecológico La Huasteca" (perteneciente al Parque Nacional Cumbres de Monterrey, dentro del municipio mencionado). Este está catalogado como uno de los ríos con mayor velocidad de afluente a nivel mundial. En su trayecto es alimentado por diferentes arroyos, uno de los cuales es el Arroyo del Obispo, que se encuentra dentro del área de estudio y a su vez se alimenta de la cañadas (zonas de drenaje natural) existentes en las zonas de pedimento en lo alto del Cerro de las Mitras. El río Santa Catarina fue un río perene, pero actualmente es un río intermitente, debido a que el agua captada por su cuenca, aguas arriba, es explotado para uso del AMM.

Los diferentes cauces hidrológicos existentes dentro del municipio de Santa Catarina son del tipo intermitentes. Estos llegan a presentar agua en épocas de lluvia. Dentro de la zona estudiada existen varias cañadas que se encuentran obstaculizadas por asentamientos civiles (colonias). En la figura 3.4 se observa en azul los afluentes, cañadas, arroyos y ríos, dentro del área de estudio, y como algunas de estas cañadas, marcadas en azul, no llegan a conectar con el arroyo del Obispo y, finalmente, con el río Santa Catarina. Con ayuda de una imagen de sombras y relieve, resultado de la aplicación de filtros con un SIG a una imagen raster proporcionada por el INEGI (carta G14-C25), se puede observar el trayecto natural a seguir de estas cañadas.

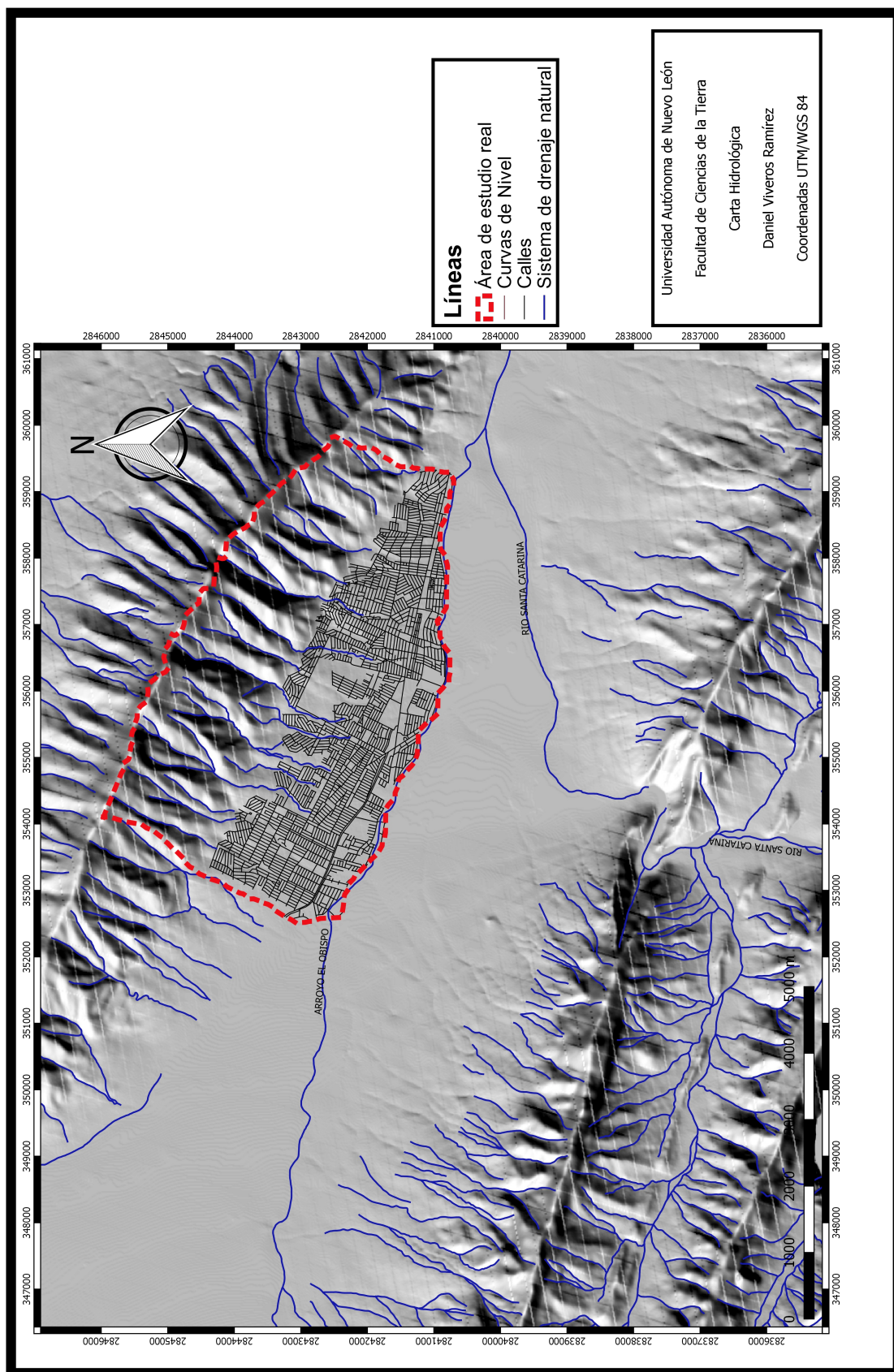


Figura 3.4. Mapa hidrologico que muestra algunas cañadas en azul que no alcanzan a conectarse con el río Santa Catarina. Imagen raster proporcionada por el INEGI (carta G14-C25)(Anexo II)

3.2.3 Cartografía Geológica

El Cerro de las Mitras es una estructura del tipo braquianticlinal, esto se refiere a que es una estructura anticlinal poco alargada. Tiene una orientación de WNW a ESE, ligeramente convexa hacia el NNE. Al ser un anticlinal se tiene en su núcleo la formación aflorante más antigua, siendo las calizas masivas de la Formación Cupido, las cuales coronan el anticlinal. Mientras que en la parte más baja se encuentra material no consolidado del Plioceno - Cuaternario (Figura 3.5).

Haciendo un recorrido desde la parte superior hasta llegar al pie del anticlinal, tenemos un avance progresivo de la columna estratigráfica establecida por Michalzik (1988), desde la Formación Cupido, pasando por la formaciones La Peña, Aurora, Cuesta del Cura y Agua Nueva. Las formaciones San Felipe y Méndez no se apreciaron en el área de estudio, ya que están cubiertos por material mas reciente del cuaternario o por la mancha Urbana (Figura 2.3). La descripción de estas formaciones se realizó en el capítulo 2.

Durante la toma de datos estructurales no se observaron fallas importantes en el área. Con los datos estructurales obtenidos y la caracterización cualitativa del macizo rocoso (Estudios Geomecánicos), se realizó el estudio de un par de taludes, de los cuales se explica su análisis cinemático en el siguiente capítulo.

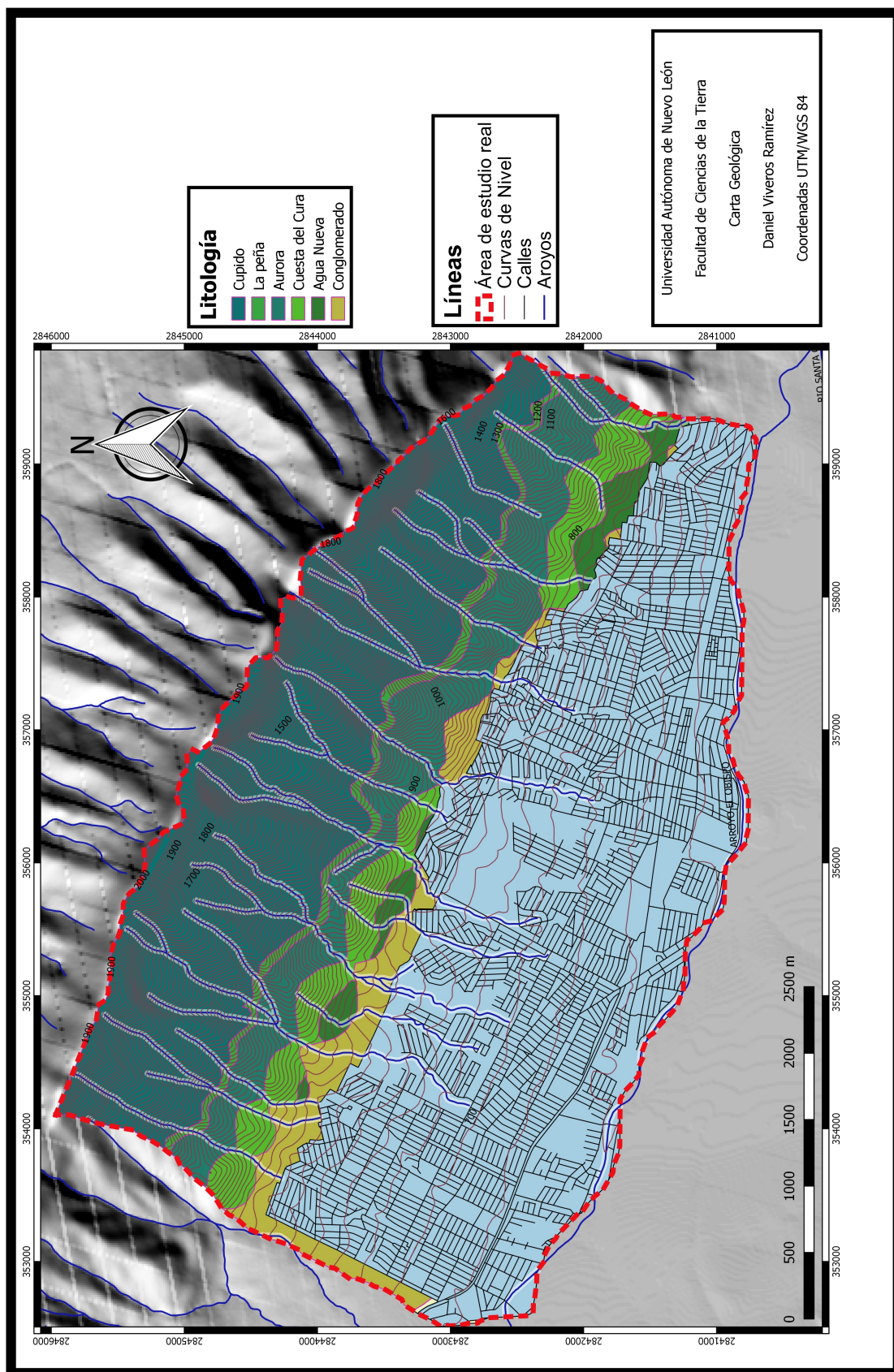


Figura 3.5. Mapa geológico del área de estudio. Se aprecian formaciones geológicas por encima de la cota 800, y por debajo de esta la mancha urbana ha cubierto afloramientos de manera extensiva, arroyos truncados en azul por la mancha urbana en celeste (Anexo III)

3.3 Cartas Inventario

El objetivo de este tipo de cartas es tener un registro de la localización de los fenómenos ocurridos, su tipo, zonas de afectación y la intensidad de estos, además de sus diferentes características. El realizar este tipo de cartografía sistemática (cartas de inventarios), ayudará a visualizar de una forma ordenada, los procesos geológicos que seguirían ocurriendo en el área de estudio y prevenir zonas de mayor peligro (libre de construcción) o zonas ya urbanizadas de alto riesgo geológico que serán afectadas.

3.3.1 Tipos de Movimientos en Masa

En cuanto a los tipos de fenómenos a los que una zona de ladera, como lo es la zona de estudio, puede verse expuesta, se encuentran algunos de los diferentes tipos de Movimientos en Masa o Procesos de Remoción de Masa. Estos procesos pueden clasificarse según Varnes (1978) de la siguiente manera, ejemplificados en la Figura 3.6, (Brunetti, 2014):

Caídos

Son desprendimientos y caída de materiales del talud, en los cuales se desprende una masa de cualquier tamaño, desde zonas de pendiente fuerte a lo largo de una superficie en la cual el desplazamiento de corte es mínimo o no ocurre. Estos deslizamientos se producen principalmente por caída libre, a saltos o rodando. Este tipo de Movimientos en Masa pueden incluir desde suelo y partículas relativamente pequeñas, hasta bloques de varios metros cúbicos. Los fragmentos son de diferentes tamaños y, generalmente, se rompen durante su viaje hasta el área de depósito.

Vuelcos

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia el frente del talud de una unidad o unidades de material (suelos y/o rocas) con centro de giro por debajo del centro de gravedad de esta. Por lo general, ocurren en las formaciones rocosas, pero también, se presentan en suelos cohesivos secos y en suelos residuales.

La configuración de la estructura geológica determina la forma de la volcadura. En los macizos rocosos, las fracturas definen las características del movimiento. En los vuelcos de suelo, las grietas de tensión, la cohesión de los materiales, la altura y la pendiente de los taludes, determinan el volumen de la masa, la magnitud del movimiento y la posibilidad de desmoronamiento, caído o flujo.

Deslizamientos

Consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies. Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes.

■ **Rotacional**

En un desplazamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento.

■ **Traslacional**

En el desplazamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada, y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación.

Flujos

En este tipo de MM ocurren movimientos relativos de las partículas, o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie. Las deformaciones relativas internas son muy grandes y fluyen en forma similar a un líquido viscoso. El flujo puede ser laminar a turbulento. Este tipo de Movimientos de Masa pueden activarse por la presencia de alguno o varios factores como las lluvias, deshielo de nevados, sismos y/o la alteración de suelos no consolidados. Los flujos pueden ser de bloques de roca, flujos de

3.3. CARTAS INVENTARIO

detritos (residuos), flujos de lodo o una combinación de estos.

Complejos

Son Movimientos en Masa resultado de la combinación de dos o varios de los diferentes tipos antes mencionados.








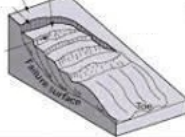

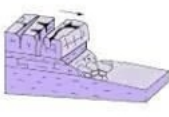

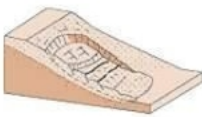
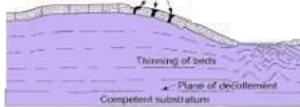






Material		Roca	Derrubios	Suelo
Tipo Deslizamiento				
Caidos				
				
Deslizamientos	Rotacionales			
	Traslacionales			
Laterales				
Flujos				
Complejos				

Figura 3.6. Tipos de movimientos de ladera, tomado de Brunetti (2014).

3.3.2 Movimientos de Masa en la zona de estudio

Para la zona de estudio no se cuenta con una carta que detalle estas características y, al menos en la zona urbanizada, es difícil distinguir evidencias de MM recientes, por lo que se recurrió a encuestar a los habitantes de la zona, para tratar de establecer antecedentes sobre zonas que hayan sido afectadas en el pasado.

Dentro del área de estudio, puede observarse evidencia de antiguos Movimientos en Masa ocurridos antes de la urbanización del municipio. Estas se encuentran en la parte media del anticlinal, sobre las colonias más altas (Figura 3.7). Así mismo, existen bloques de caliza de varios metros de diámetro en las zonas más bajas del flanco sur del anticlinal, evidenciando aun más los Procesos de Remoción de Masa de la zona.



Figura 3.7. Antiguos movimientos en masa con presencia de bloques inestables, además de evidencia de explotación de caliza en abandono

3.4 Cartas de Ingeniería Geológica

De acuerdo con González de Vallejo et al. (2002), los mapas geotécnicos (engineering geological maps) constituyen un método para presentar cartográficamente información geológico - geotécnica con fines de planificación, uso del territorio y para el proyecto, construcción y mantenimiento de obras de ingeniería; dichos mapas aportan datos sobre las características y propiedades del suelo y del subsuelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los problemas geológicos y geotécnicos.

3.4.1 Escala

Para la realización de una buena cartografía de Ingeniería Geológica es imprescindible seleccionar la escala más adecuada, por lo que ubicar el objetivo principal del proyecto es de vital importancia. Según la International Association of Engineering Geology (1976), los mapas de ingeniería geológica pueden dividirse de acuerdo a los datos a contener en las siguientes escalas:

- Gran escala (Local): de 1:10,000 o mayores.
- Media Escala: Menores de 1:10,000 pero mayores de 1:100,000.
- Pequeña escala (Regional): de 1:100,000 o menores.

3.4.2 Contenido de los mapas de Ingeniería Geológica

Para los fines de la presente tesis y de acuerdo a los datos levantados en campo (datos a contener de la carta), se escogieron dos tipos de mapas, de acuerdo con la escala: Carta mediana (1: 25,000) y Local (para la escala 1:10,000). Los datos a contener en la carta tipo regional son:

- Datos geológicos.
- Unidades litológicas.

- Estructuras geotectónicas.
- Rasgos geomorfológicos regionales.
- Grandes zonas afectadas por procesos.
- Información general de interés geotécnico e interpretaciones.

Estos elementos ayudan en la planificación y reconocimiento preliminar proporcionando una información general sobre la región, así como los tipos de materiales existentes. Mientras que para las cartas del tipo local el contenido se basaría en:

- Descripción y clasificación de suelos y rocas,
- Estructuras,
- Geomorfología,
- Condiciones hidrogeológicas,
- Procesos geodinámicos y
- Localización de materiales para construcción.

Estas cartas ayudan a planear la viabilidad de las obras, así como para tener un reconocimiento detallado. Reuter et al. (1978) estableció una relación sobre los puntos a documentar de modo geológico y geotécnico, por kilómetro cuadrado, dentro del área de estudio (Tabla 3.2). Esta metodología se empleó en la elaboración de las cartas a escala 1:25,000 y 1:10,000 de esta tesis, donde las condiciones del terreno lo permitieron.

3.4. CARTAS DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

Documentación de puntos por kilómetro cuadrado y la distancia de los puntos a dos niveles de dificultad				
Escala	Grado de dificultad	Número de puntos de documentación por km ²	Distancia de los puntos de documentación en el terreno en m.	Distancia de los puntos de documentación en el mapa en cm.
1:100,000	E	1	1000	1.0
	K	3	580	0.6
1:50,000	E	2.5	640	1.3
	K	9	340	0.7
1:25,000	E	6	410	1.6
	K	22	220	0.9
1:10,000	E	20	225	2.3
	K	82	110	1.1
1:5,000	E	50	145	2.9
	K	235	65	1.3
1:2,000	E	160	80	4.0
	K	930	33	1.6
1:1,000	E	400	50	5.0
	K	25000	20	2.0
E= condiciones geológicas sencillas				
K= condiciones geológicas complejas				

Tabla 3.2. Documentación por km² (Reuter et al., 1978).

3.4.3 Clasificación de zonas homogéneas

Existen diferentes criterios para la clasificación de macizos rocosos entre los que se encuentran el litológico y el criterio por discontinuidades, siendo el principal y el utilizado en esta cartografía el litológico. En el presente trabajo se utilizó el criterio litológico.

LITOLÓGICO

1. Rocas Calizas,
2. Rocas Calizas Arcillosas,
3. Rocas Arcillosas (No en el área de estudio),
4. Material Cuaternario y

5. Zona Urbana.

Cabe señalar que el presente trabajo, dada las condiciones de densidad de la población en el área de estudio, fue necesario establecer una Zona Urbana. Si bien, la zona urbana no pertenece a un macizo rocoso, permite diferenciar un tipo de material con características y con comportamiento diferenciado del resto, por lo que se incluyó en esta clasificación.

Aunque no se llevo a cabo una clasificación por criterio de discontinuidades es importante describir los parámetros utilizados por este.

3.4.3.1 Rocas Calizas

La Zona Homogénea de Rocas Calizas esta constituida por las formaciones Cupido, La Peña y Aurora. Las rocas de las formaciones Cupido y Aurora corresponden a calizas masivas, mientras que la Formación La Peña esta conformada por rocas arcillosas. Aún y cuando existen diferencias muy marcadas entre la composición litológica de esta formación con las formaciones de calizas masivas, en este trabajo fueron colocadas dentro de una misma zona homogénea, debido la ubicación entre las formaciones Cupido y Aurora y al delgado espesor de la Formación La Peña.

Esta zona homogénea es la que se encuentra en la parte superior de la zona de estudio, teniendo unos sitios de difícil acceso. Dentro de esta, se pudieron observar estructuras de tipo Karren y Lapiace que son procesos de meteorización química, además de diversas zonas de extracción de caliza en abandono.

En cuanto al fracturamiento de las rocas que comprenden esta zona homogénea, este es espaciado dentro del rango de 0.6 - 2 metros según la metodología de Bieniawski and Bieniawski (1989).

Dentro de la zona se pueden presentar algunas discontinuidades rellenas de calcita.

3.4.3.2 Rocas Calizas - Arcillosas

En la Zona Homogénea de Rocas Calizas - Arcillosas se agrupan las formaciones Cuesta del Cura, Agua Nueva y San Felipe (aunque esta última no aflora en el área de estudio).

En esta zona homogénea el fracturamiento es menos amplio entre sí pero conservando la configuración del fracturamiento de la zona homogénea de rocas calizas. Debido a esto mismo, el intemperismo de la roca en esta zona varía de sana a intemperizada. En esta zona también se presentan algunas canteras inactivas, específicamente en la Formación Cuesta del Cura.

El relleno de fracturas y de algunas discontinuidades es de materiales autóctonos como calcita y arcillas, producto de la circulación de agua en el medio.

3.4.3.3 Rocas Arcillosas - Margosas

Esta zona homogénea corresponde exclusivamente a la Formación Méndez, y no aflora en el área de estudio por estar cubierta por la siguiente zona homogénea.

3.4.3.4 Material Cuaternario

Esta zona homogénea está compuesta por material cuaternario, el cual fue clasificado según Chapa Guerrero et al. (1993), este fue descrito en el capítulo 2.

3.4.3.5 Zona Urbana

Esta zona homogénea está formada por la zona urbanizada del municipio, esto quiere decir que es toda el área ya construida o en su defecto en proceso de urbanización. La finalidad de delimitar esta zona es situar el área que pueda llegar a ser afectada por algún riesgo geológico.

3.4.4 Clasificación de zonas morfológicas

El objetivo de las Zonas Homogéneas es agrupar de acuerdo a las propiedades físicas y mecánica, las unidades litológicas, ya sean de roca o de suelos presentes en el área de estudio, conforme la litología presente y su estratificación, grado de fracturamiento, estado de intemperismo y geomorfología.

En esta clasificación se utilizaron dos diferentes criterios para la elaboración de las cartas de pendientes del área de estudio. Una es la utilizada por la SEGOB (2016), mediante la Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorio y Urbano (SEDATU), la cual define 6 niveles de pendiente para establecer los parámetros geomorfológicos en los Atlas de Riesgo municipales y/o estatales (Tabla 3.4 y Figura 3.8). Por otro lado, la otra metodología que se empleó es la utilizada por Chapa Guerrero (1993) al realizar un estudio geológico, en el municipio de San Pedro Garza García, donde dividió la zona de estudio en diferentes Zonas Morfológicas, tomando en cuenta tres niveles de pendiente en sus cartas (Tabla 3.3 y Figura 3.9); así mismo, estos parámetros fueron utilizados en otros estudios de Riesgos Geológicos en el AMM (Sánchez Carlín, 2001).

Clasificación	Ángulo de inclinación (pendiente)
Baja	Entre 0 y 5 grados
Mediana	Entre 5 y 15 grados
Alta	Mayores de 15 grados

Tabla 3.3. Pendiente según grados inclinación
(Chapa Guerrero et al., 1994).

Pendiente (ángulo de inclinación)
0 a 3 grados
3 a 6 grados
6 a 15 grados
15 a 30 grados
30 a 45 grados
>45 grados

Tabla 3.4. Pendiente según grados de inclinación
(SEGOB, 2016).

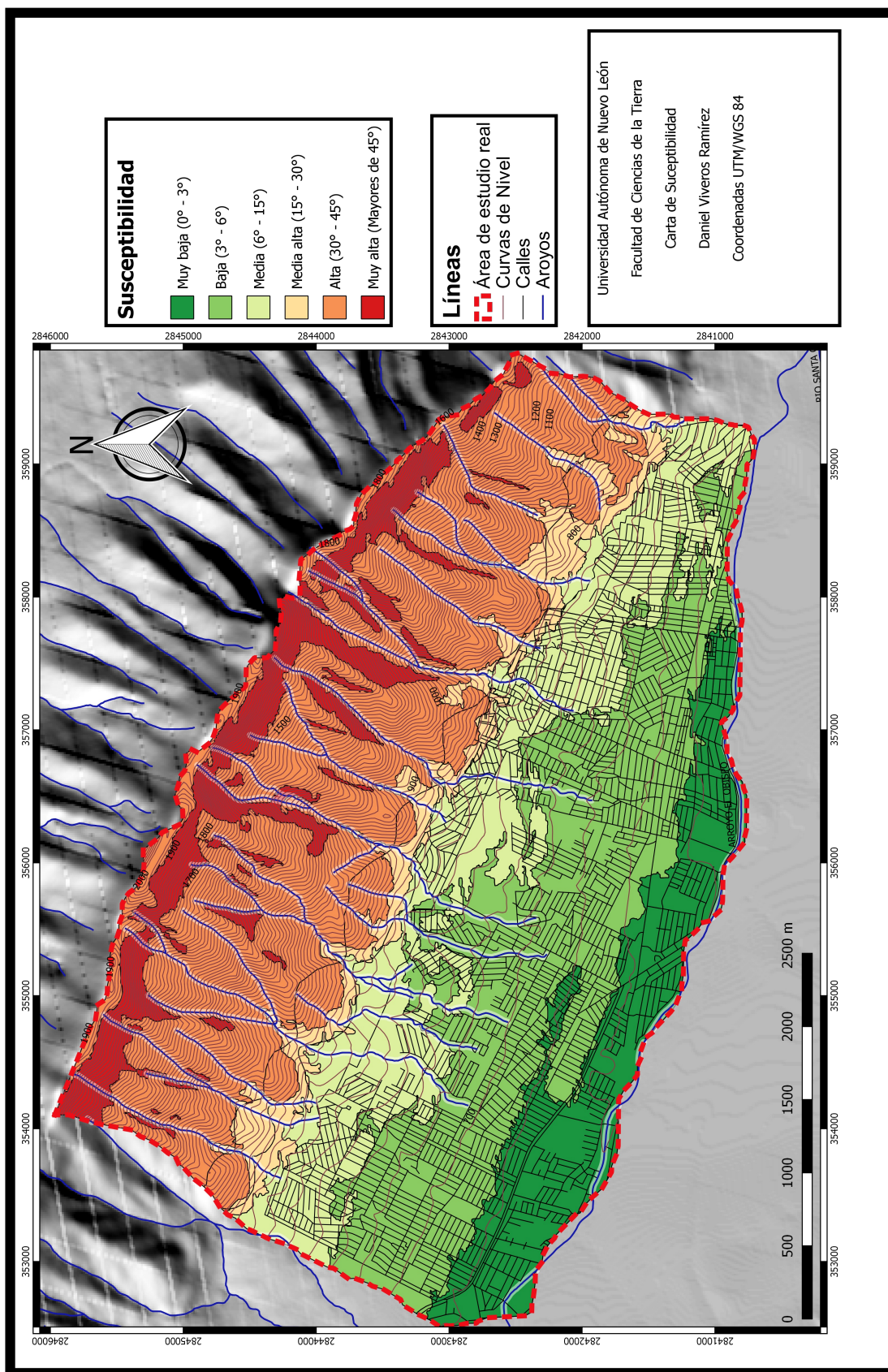


Figura 3.8. Carta morfológica con seis rangos de pendiente del área de estudio (SEGOB, 2016) (Anexo IV).

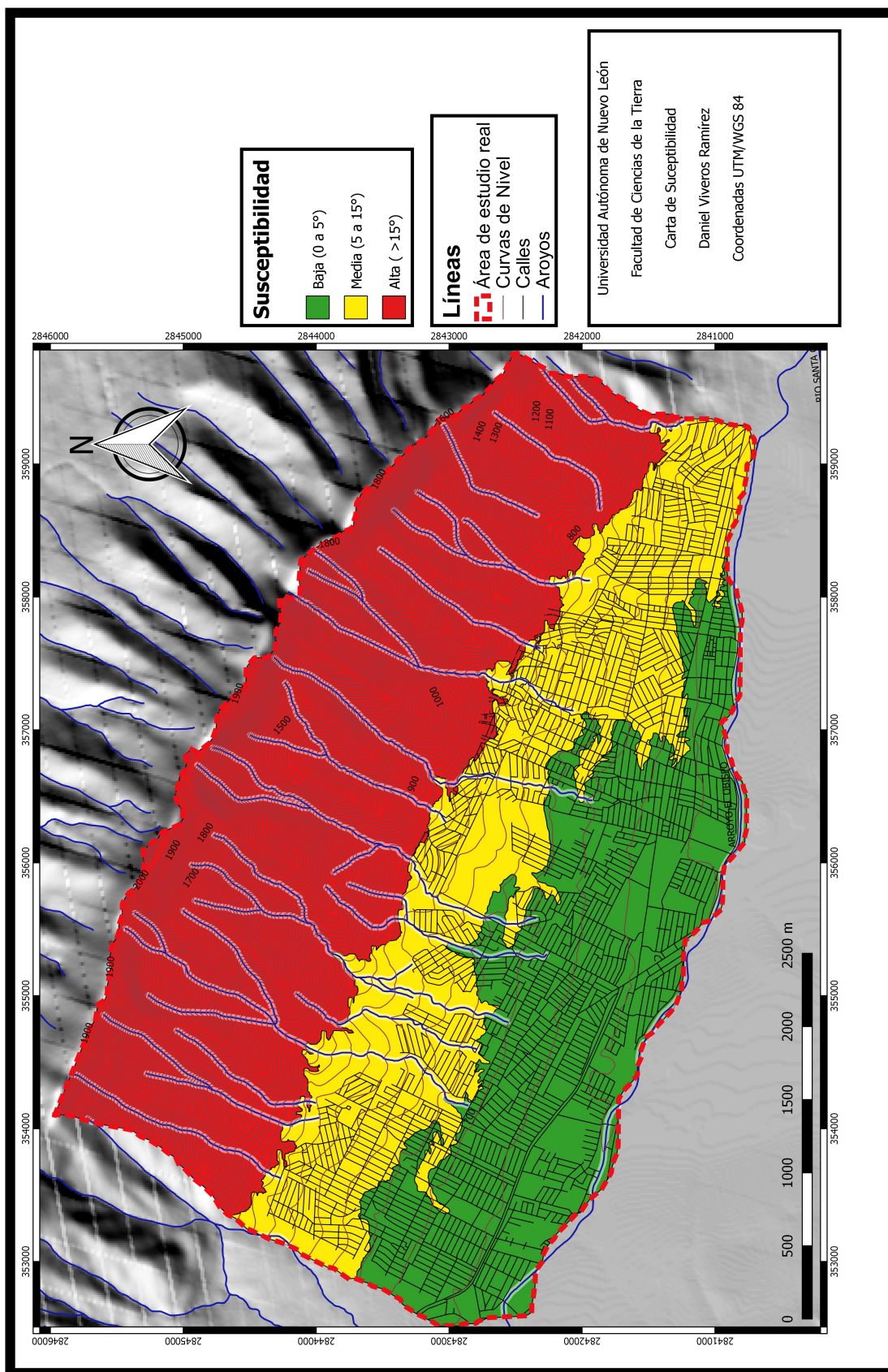


Figura 3.9. Carta morfológico con tres rangos de pendiente (tipo semáforo) (Chapa Guerrero et al., 1994) (Anexo V).

3.4.5 Carta de Zonas de Riesgos

Estas metodologías de pendiente al ser utilizada junto con el mapa de zonas con similitudes geomecánicas, arrojan lo que en este trabajo denominamos "Mapas de Zonas de Riesgo".

Esto permitió la diferenciación de zonas homogéneas con base en el material aflorante y su pendiente. La combinación de la carta de zonas geomecánicas similares con la carta de pendientes, según la metodología de SEGOB (2016) arrojó un total de 18 zonas homogéneas, incluyendo los arroyos como una de ellas, mientras que empleando la metodología de Chapa Guerrero (1993) se generaron un total de 11 zonas de riesgo, tomando el mismo criterio para los arroyos.

Al obtener una diferencia de siete zonas de riesgo entre ambas metodologías, se decidió trabajar con la de Chapa Guerrero (1993), debido a que se puede usar de una manera más general y englobar algunas de las zonas de menor definidas por la metodología SEGOB (2016), buscando que este trabajo sea una herramienta más para la planeación de desarrollos urbanos.

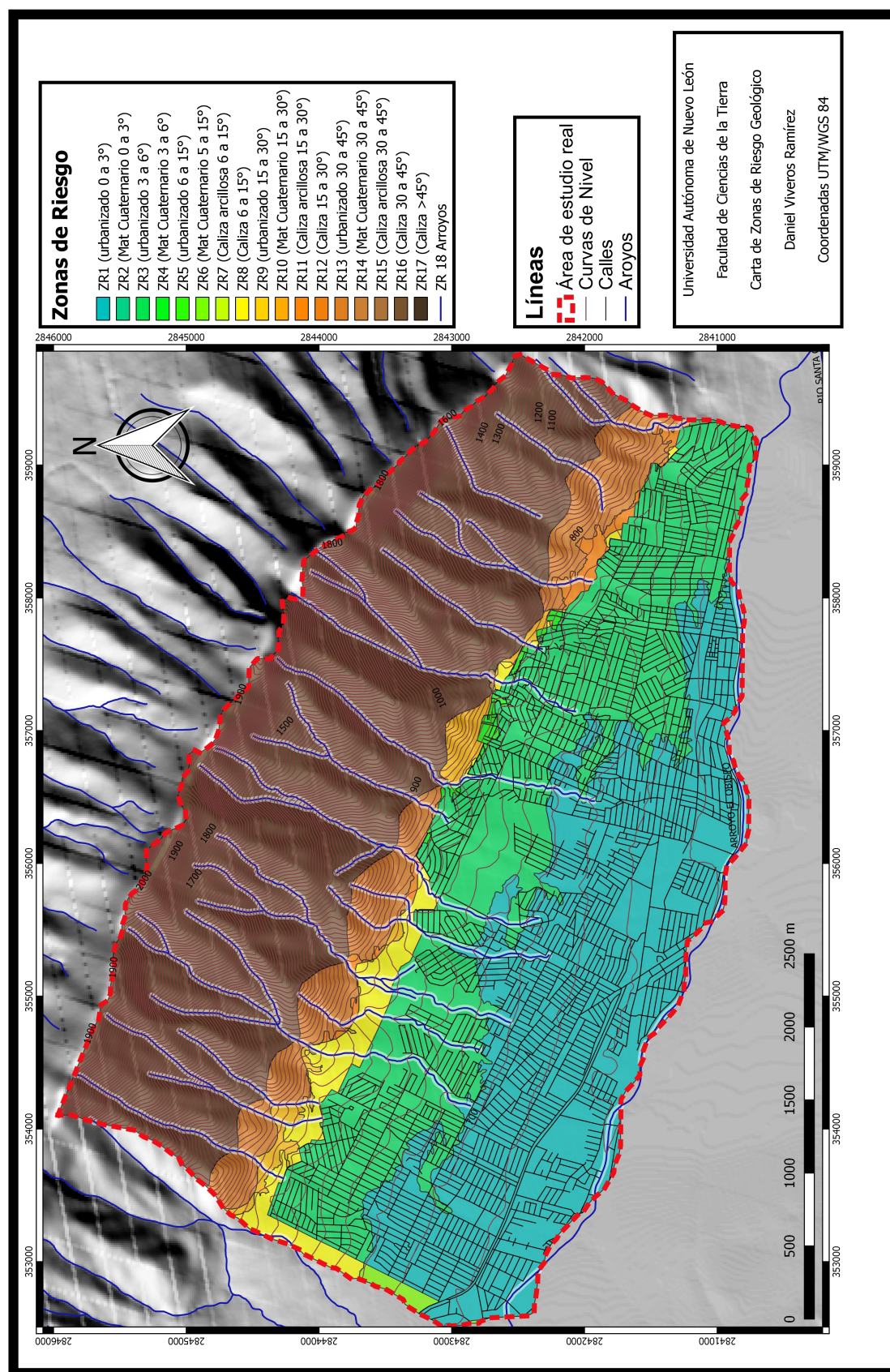


Figura 3.10. Zonas de Riesgos Geológicos utilizando la metodología de SEGOB (2016) (Anexo VI).

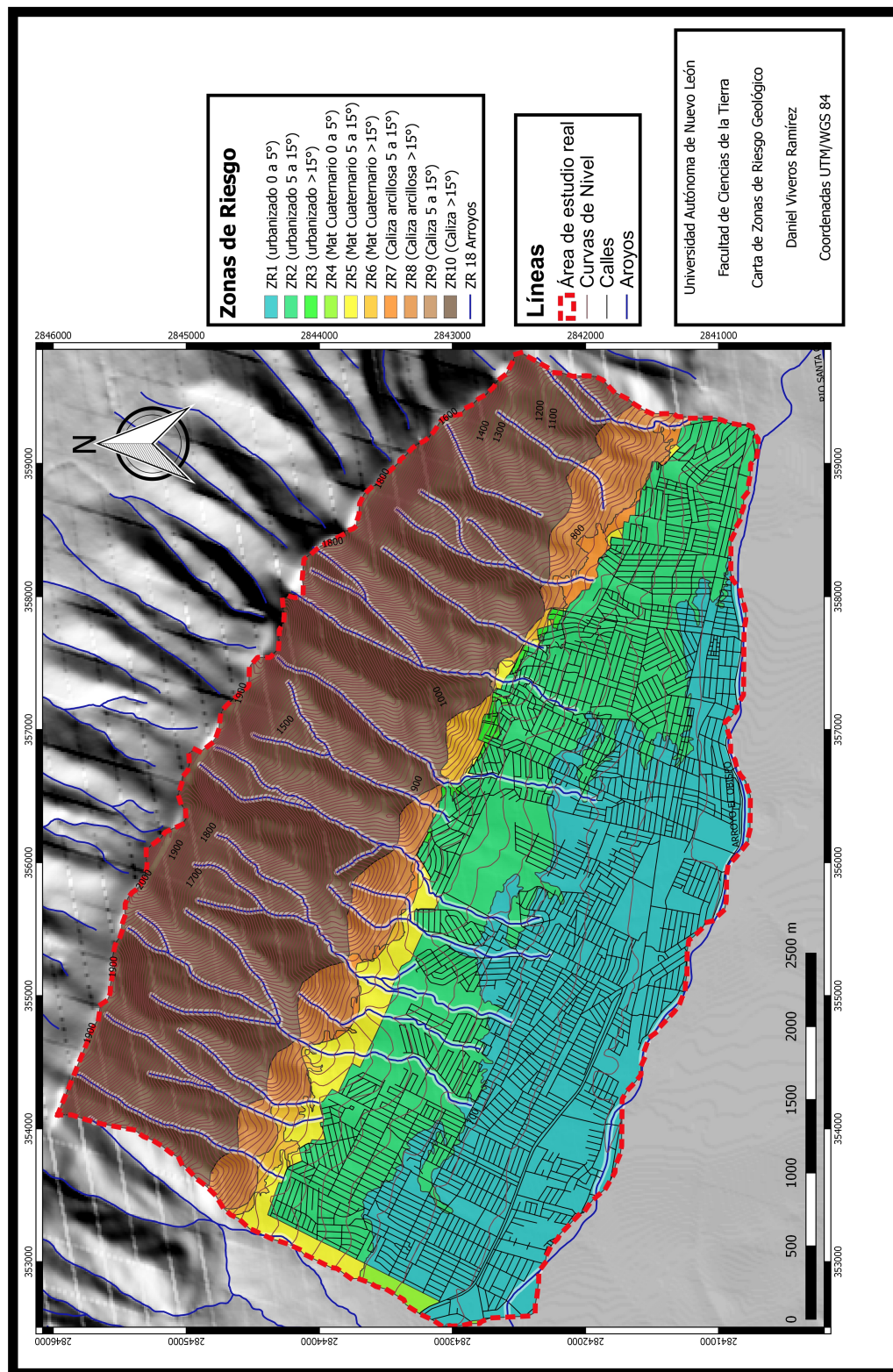


Figura 3.11. Zonas de Riesgos Geológicos utilizando la metodología de Chapala Guerrero (1993) (Anexo VII).

Capítulo 4

Riesgos Geológicos

Como se mencionó en los primeros capítulos, la Tierra es un planeta dinámico en el cual se presentan diversos procesos geodinámicos y/o meteorológicos que generan eventos naturales como vulcanismo, sismicidad, ciclones, etc. Estos fenómenos naturales por sí solos liberan una cantidad enorme de energía, lo que puede ocasionar daños y afectaciones a las personas o a la infraestructura que se encuentre desplantada en la superficie del planeta.

Cuando dichos fenómenos naturales amenazan y/o producen daños en zonas poblacionales, se habla de peligrosidad, riesgo y vulnerabilidad. Para ello es necesario tener muy bien entendidos estos conceptos:

Peligrosidad (P)

Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio. En otras palabras se refiere a la probabilidad (frecuencia) de que ocurra un fenómeno natural en cierto lugar o área.

Vulnerabilidad (V)

Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

Riesgo (R)

Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica, debido a la ocurrencia de un desastre. Este parámetro puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$R = P \times V \times C$$

Siendo C, la representación de los costos generados por los fenómenos actuantes.

Dada la anterior ecuación, se debe de desglosar la información requerida para llegar a cada uno de estos conceptos.

4.1 Carta de Peligrosidad

Para poder entender la peligrosidad que actúa sobre el área de estudio, es de suma importancia conocer los diferentes agentes que deben presentarse para cada proceso natural.

Los peligros por movimientos en masa cuentan con dos grupos de actores para su desarrollo, los agentes condicionantes y los agentes desencadenantes. Los agentes condicionantes, o pasivos, son los elementos presentes en la naturaleza como el relieve, la litología, la estructura del sitio, etc. Mientras que los agentes detonantes, o activos, son los elementos externos que desencadenan las inestabilidades y tienen una responsabilidad de la magnitud y velocidad con la que ocurren.

La influencia y efectos de los diferentes factores (condicionantes y desencadenantes) en las condiciones de los materiales y de las laderas, se describen en la Tabla 4.1.

4.1. CARTA DE PELIGROSIDAD

	Agentes	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendiente, geometría)	Distribución del peso del terreno.
	Litología (composición y textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento, hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de procesos intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno. Saturación de los suelos. Erosión.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento en presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos de la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Tabla 4.1. Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas, tomado de González de Vallejo et al. (2002).

En esta tabla se puede apreciar la relación existente entre los factores condicionantes y desencadenantes, así como el factor humano (antropogénico) en los efectos e influencia del sitio.

4.1.1 Agentes Condicionantes

Los principales Agentes Condicionantes (relieve, litología, propiedades geomecánicas) se encuentran englobados en las cartas de zonas homogéneas del capítulo III. En dichas cartas se utilizan criterios de ángulo de pendiente y tipo de material predominante en la zona.

4.1.2 Agentes Desencadenantes

Dentro de los agentes desencadenantes para la activación de Riesgos Geológicos dentro del área de estudio, se encuentran dos factores principales, sismicidad y lluvias torrenciales, siendo este último el agente desencadenante en el cual se enfoca esta tesis.

La zona urbana del municipio de Santa Catarina presenta un clima seco semicálido abarcando el área de estudio este tipo de clima. La temperatura promedio anual es de 21.1 °C. El mes más frío es enero, con una temperatura promedio de 13.3 °C. Los meses más cálidos son julio y agosto con una temperatura promedio de 27.2 °C en ambos meses (de Santa Catarina, 2015).

Para conocer el promedio de precipitación del área de estudio se realizaron gráficas con los datos obtenidos de las agencias gubernamentales (INEGI, Comisión Nacional del Agua), en relación con la precipitación de los años 1947 – 2008 (Figuras 4.1 y 4.2).

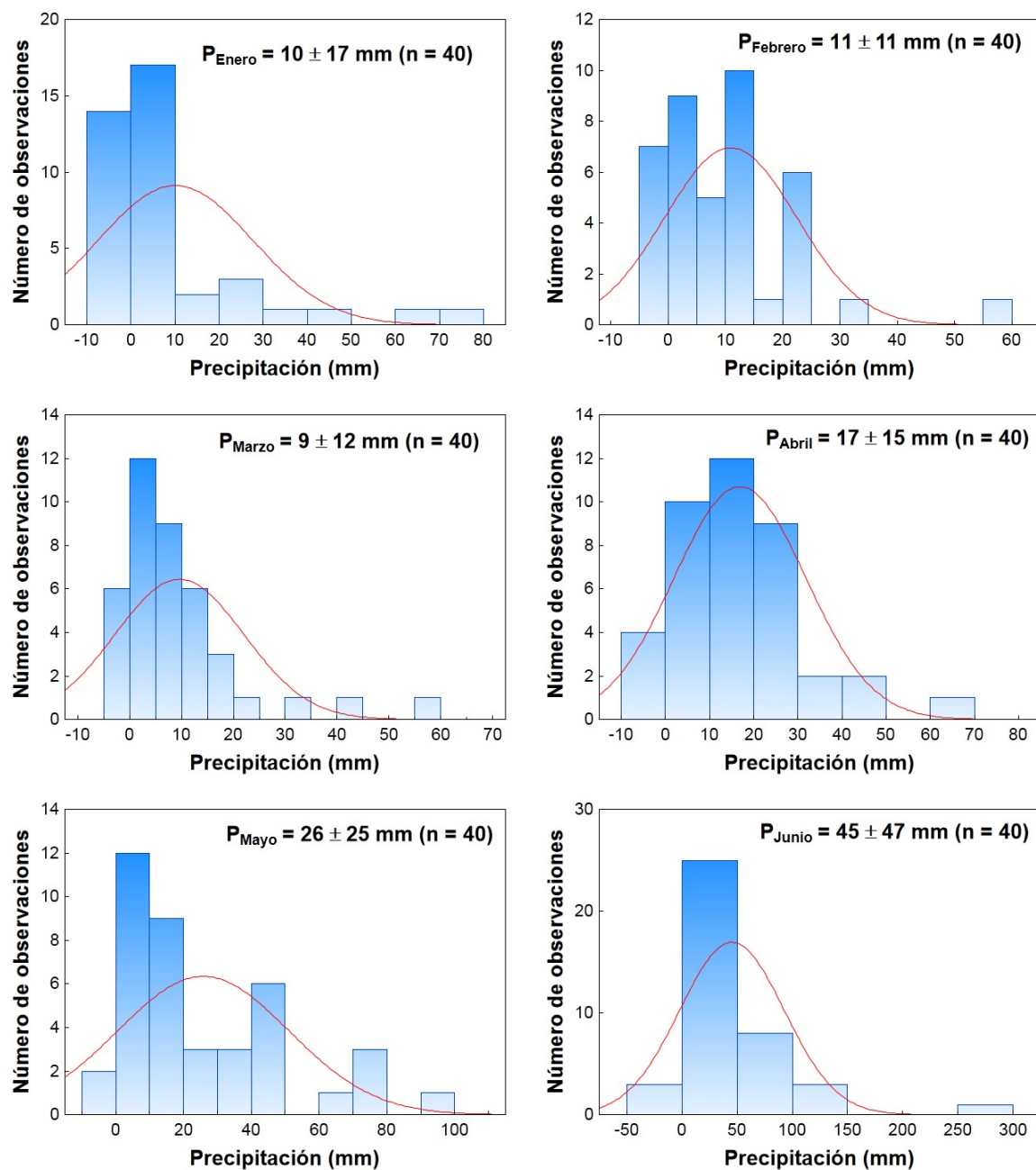


Figura 4.1. Histogramas relacionados a la precipitación mensual en la estación meteorológica Santa Catarina, N.L. (Periodo Enero – Junio 1947 – 2008; Comisión Nacional del Agua, 2018).

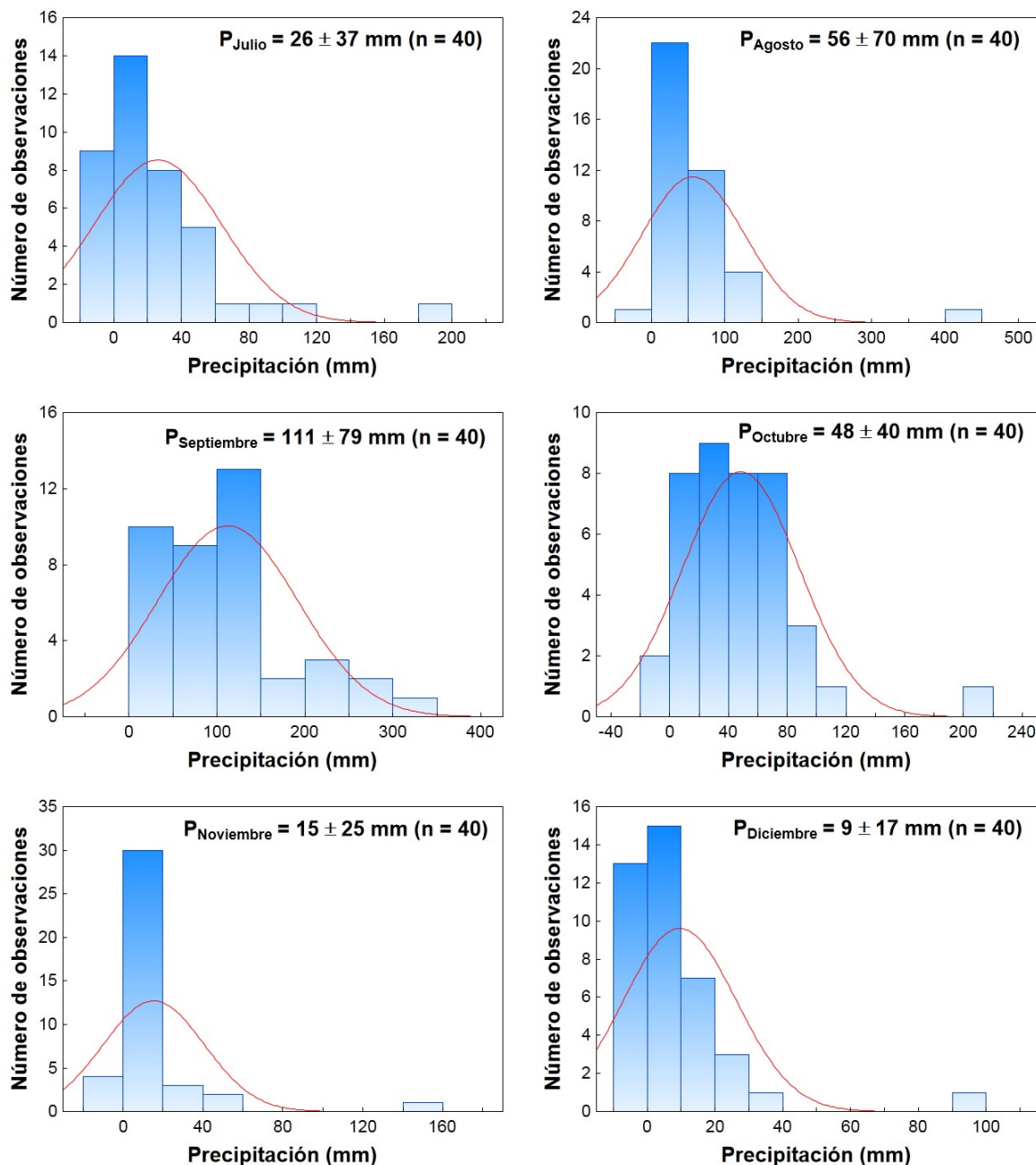


Figura 4.2. Histogramas relacionados a la precipitación mensual en la estación meteorológica Santa Catarina, N.L. (Periodo Julio – Diciembre 1947 – 2008; Comisión Nacional del Agua, 2018).

De acuerdo al análisis de datos se puede observar que los cuatro meses donde se producen más lluvias son: Junio, Agosto, Septiembre y Octubre. Siendo Septiembre el mes donde más lluvia históricamente se ha registrado.

Según datos de Sanchez-Castillo et al. (2017) en su estudio sobre movimientos en masa en suelos no consolidados, el promedio menor de precipitación para la activación de estos sucesos es de 57.7 mm para la parte poniente del AMM. Siguiendo con los parámetros de activación por precipitación mencionados en dicho estudio, los meses donde es más probable que ocurra un fenómeno de Movimiento en Masa activado por lluvia son Junio, Agosto, Septiembre y Octubre, según la desviación estándar mostrada. Según los registros de Sanchez-Castillo et al. (2017) sobre movimientos en masa, el mes que presenta la mayor cantidad de registros de estos eventos es el mes de Septiembre.

4.2 Clasificación Geomecánica

Debido a la gran variante de propiedades que presentan los macizos rocosos, además de los factores que los condicionan, su caracterización es una tarea muy compleja. Con el objetivo de poder analizar y obtener mejores resultados en el estudio de los macizos rocosos, surgieron diferentes tipos de clasificaciones geomecánicas, dependiendo de los requerimientos de los resultados. Dichas clasificaciones dan por resultado la generación de parámetros a observar para la características de los macizos rocosos, que posteriormente se utilizarán para el análisis Geotécnico o cuantitativo.

De acuerdo con González de Vallejo et al. (2002), las características de los macizos rocosos que se consideran en las distintas clasificaciones son las siguientes:

- Resistencia del material rocoso,
- Índice RQD,
- Espaciado orientación y condiciones de las discontinuidades,
- Estructura geológica y fallas,
- Filtraciones y presencia de agua, y

- Estado tensional.

Las clasificaciones más utilizadas en la actualidad son la *Rock Mass Rating* (RMR) y la Q. Estas dos clasificaciones son de mucha utilidad en el análisis de Riesgos Geológicos, sobre todo en el análisis de los Movimientos en Masa.

El sistema Rock Mass Rating (RMR) fue presentado hace 40 años por el Profesor Bieniawski en 1937, y actualizado en Bieniawski and Bieniawski (1989). Este sistema es una referencia mundial para clasificar los macizos rocosos, establecer sus propiedades tenso-deformacionales y estimar empíricamente el sostenimiento de las excavaciones subterráneas. El RMR toma a consideración los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa,
- Grado de fracturación en términos del RQD,
- Espaciado de las discontinuidades,
- Condiciones de las discontinuidades,
- Condiciones hidrogeológicas, y
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

El RMR clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, valorando cinco parámetros; de acuerdo a los criterios presentados en la Tabla 4.2.

4.2. CLASIFICACIÓN GEOMECAÁNICA

1	Resistencia de la matriz	Ensayo de carga puntual	> 10	10 – 4	4 – 2	2 – 1	Compresión simple (MPa)		
	rocosa (MPa)	Compresión simple	> 250	250 – 100	100 – 50	50 – 25	25 – 5	5 – 1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100 % – 90 %	90 % – 75 %	75 % – 50 %	50 % – 25 %	< 25 %		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación de diaclasas		> 2m	2 – 0.6m	0.6 – 0.2m	0.2 – 0.06m	< 0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1m	1 – 3m	3 – 10m	10 – 20m	> 20m		
	Puntuación		6	4	2	1	0		
	Abertura		Nada	< 0.1mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5mm	> 5mm		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
	Puntuación		6	4	2	2	0		
	Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10litros/min	10 – 25litros/min	25 – 125litros/min	> 250litros/min		
		Relación: presión de agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Tabla 4.2. Parámetros de clasificación de RMR (Bieniawski and Bieniawski, 1989).

De acuerdo a la sumatoria de la puntuación obtenida por la evaluación de los parámetros antes mencionados, al macizo rocoso se le asigna una Clase, la cual indica la calidad de este (Tabla 4.3).

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100 - 81	$> 4Kg/cm^2$	$> 45^\circ$
II	Buena	80 - 61	$3 - 4Kg/cm^2$	$35^\circ - 45^\circ$
III	Media	60 - 41	$2 - 3Kg/cm^2$	$25^\circ - 35^\circ$
IV	Mala	40 - 21	$1 - 2Kg/cm^2$	$15^\circ - 25^\circ$
V	Muy mala	< 20	$< 1Kg/cm^2$	$< 15^\circ$

Tabla 4.3. Índice de calidad (Rock Mass Rating), tomado de Chapa Arce (2017).

Con la clase (I-V) resultante, de acuerdo a la valoración obtenida del RMR, se obtienen los valores de cohesión y ángulo de fricción o de rozamiento, utilizados para los análisis cinemático y factores de seguridad de taludes en el área de estudio (González de Vallejo et al., 2002).

4.2.1 Caracterización geomecánica en el área de estudio

Se realizó una caracterización geomecánica, utilizando el método RMR en macizos rocosos (taludes) de dos formaciones representando las Zonas Homogéneas presentes en el área de estudio: Zona homogénea de rocas calizas (Formación Aurora) y Zona Homogénea de rocas calizas - arcillosas (Formación Cuesta del Cura). Es importante resaltar que, debido difícil al acceso a los afloramientos de las formaciones La Peña y Cupido, así como la falta de algún macizo rocoso representativo de la Formación Agua Nueva en el área de estudio, no se realizó una clasificación específica para cada una de las formación presentes en el área de estudio.

La obtención del Índice de Calidad de la Roca (RQD, por sus siglas en inglés) no se realizó por medio de núcleos de barrenación, debido a la no costeabilidad y lo impráctico para esta tesis. Por lo anterior se utilizó el método propuesto por Palmström (1982). En

el sugiere cuando las discontinuidades sean visibles en planos expuestos o de exploración, realizar un cálculo donde se tome en cuenta el número de discontinuidades por unidad de volumen ($1m^3$), de acuerdo a la ecuación:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i}$$

J_v (índice volumétrico) = Número de discontinuidades por $1m^3$.

S_i = Espaciamiento medio entre juntas.

4.2.1.1 Valoración geomecánica de la Formación Aurora

La Formación Aurora está formada por calizas de estratos de tamaños que van desde medianos a gruesos. Presenta una compresión uniaxial de 250-100 MPa. Las mediciones en el sitio de las discontinuidades arrojan un RQD de 75 %. El espaciamiento entre discontinuidades oscila entre 0.2 a 0.6 m, presentan una superficie rugosa y una continuidad de esta con valores entre 1-3 m (Tabla 4.4).

Resistencia a la compresión uniaxial	250 – 100MPa	Valor = 12
Índice de calidad de la roca (RQD)	75	Valor = 17
Espaciamiento entre discontinuidades	2.00 – 0.6m	Valor = 15
Flujo de agua	Seco	Valor = 15
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	1 – 3m	Valor = 4
Separación de plano de juntas	0.10 – 1mm	Valor = 4
Rugosidad de los planos	Rugosa	Valor = 5
Relleno de las juntas	Duro(< 5mm)	Valor = 4
Grado de alteración	II	Valor = 5
Total		81

Tabla 4.4. Clasificación del RMR para la Formación Aurora.

4.2. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

La suma de los parámetros evaluados genera un total de 81, lo que nos sugiere la ocurrencia de un macizo rocoso Clase I, correspondiendo así a un macizo de Muy buena Calidad (Tabla 4.3).

4.2.1.2 Valoración geomecánica de la Formación Cuesta del Cura

La Formación Cuesta del Cura está formada por rocas calizas grisáceas con estratos de tamaño medio, presenta una compresión uniaxial de 250-100 MPa. Las mediciones de las discontinuidades en el sitio arrojan un RQD de 60 %. Existen familias de discontinuidades rugosas, con relleno duro (calcita) entre algunas de sus discontinuidades, espaciamiento de 0.2 – 0.6 m y con continuidad de 1 a 3 m (Tabla 4.5).

Resistencia a la compresión uniaxial	250 – 100 MPa	Valor = 12
Índice de calidad de la roca (RQD)	60	Valor = 13
Espaciamiento entre discontinuidades	0.6 – 0.2m	Valor = 10
Flujo de agua	Seco	Valor = 15
Estado de las discontinuidades		
Continuidad	1 – 3m	Valor = 4
Separación de plano de juntas	0.10 – 1mm	Valor = 4
Rugosidad de los planos	Rugosa	Valor = 5
Relleno de las juntas	Duro(< 5mm)	Valor = 4
Grado de alteración	III	Valor = 3
Total		70

Tabla 4.5. Clasificación del RMR para la Formación Cuesta del Cura.

Estos resultados, sumados con las puntuaciones de los demás parámetros medidos, produce un índice RMR de 70, correspondiendo a una roca de Clase II, indicando un macizo rocoso de BUENA calidad (Tabla 4.3).

4.3 Análisis Cinemático de taludes

Dentro del área de estudio existen taludes naturales y artificiales conformados por macizos rocosos. Los taludes artificiales son producto de la extracción de calizas para la industria cementera, entre otras. Actualmente, en el área de estudio todos los puntos de extracción se encuentran inactivos. Dentro del AMM existen casos en que estas canteras inactivas han sido fraccionadas para asentamientos civiles, lo que deriva en una población en riesgo por los diferentes procesos explicados. Un ejemplo de estos fraccionamientos es la colonia Salvador Allende en el Cerro del Topo Chico (Figura 4.3). Debido a este tipo de situaciones se decidió analizar los taludes pertenecientes a una cantera inactiva cercana a la parte urbana.



Figura 4.3. Caídos de roca dentro de la cantera inactiva de la colonia Salvador Allende, Cerro del Topo Chico. Tomado de Montalvo-Arrieta et al. (2010).

Para poder realizar el análisis de estabilidades de talud fue necesario proyectar las discontinuidades en un plano bidimensional o también conocidas como proyecciones esféricas.

Existen dos tipos de proyecciones esféricas:

- Red estereográfica de Schmidt y
- Proyección de Wulff.

Existe una limitación para el uso de estas proyecciones esféricas y esta es que al iniciar el análisis con una proyección u otra, esta debe continuar usándose (la elegida) hasta el término del proyecto (Hoek and Bray, 1977). Para la realización de este trabajo se utilizará la proyección estereográfica de Schmidt.

4.3.1 Representación Estereográfica del Círculo de Fricción

Talobre (1957) definió al cono de fricción, el cual se usa para representar el ángulo entre una línea dada y la dirección de una fuerza, y una línea normal al plano. En combinación con el ángulo de fricción o de rozamiento a través del plano, genera la aproximación para evaluar la posibilidad de deslizamiento a lo largo del plano bajo una carga activa en cualquier dirección de forma gráfica. En el análisis estereográfico de Markland (1972), este cono se representa mediante un círculo que se proyecta en la red estereográfica midiendo su ángulo a partir del extremo de la estereo-falsilla, hacia el centro del talud, dándose la definición de que aquellos planos o líneas que se encuentran dentro del área comprendida entre dicho círculo y el extremo se encontrarán estructuralmente estables (Figura 4.4).

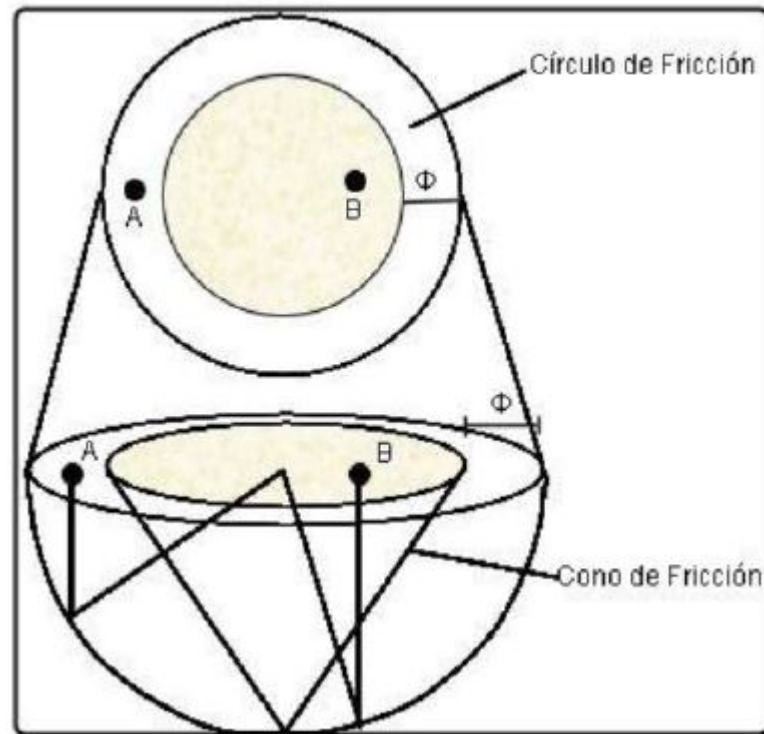


Figura 4.4. Representación estereográfica del cono de fricción. El ángulo de fricción delimitado por la proyección del cono en el hemisferio. El punto A se encuentra dentro del círculo de fricción lo cual indica que se encontrara cinemáticamente estable guardando una inclinación menor a φ ; el punto B siendo más inclinado, su proyección en el hemisferio se encuentra fuera del círculo lo cual crearía condiciones de inestabilidad (tomado de Chapa Arce (2017))

4.3.2 Análisis Cinemático de los macizos rocosos

Para la determinación de la estabilidad de un talud en un macizo rocoso se emplea el análisis cinemático. Bajo este análisis se determina los mecanismos de inestabilidad (movimientos) posibles que pudieran originarse como falla del talud dentro del mismo. La estabilidad del talud va a depender del arreglo de las familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso y el ángulo de fricción o rozamiento entre superficies de discontinuidades. El ángulo de rozamiento que se toma aquí, en el presente estudio, es el encontrado en la Tabla 4.1 con el índice de calidad de la roca. En la figura 4.5 se observa una representación estereográfica haciendo énfasis las diferentes zonas de la proyección que pueden ser estables o inestables.

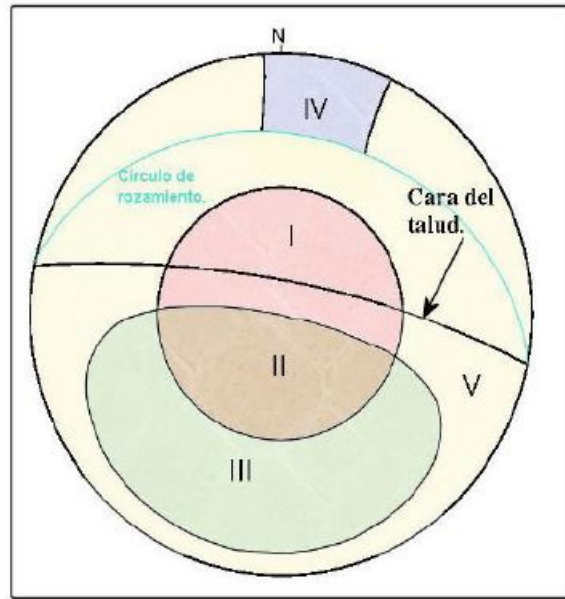


Figura 4.5. Zonas de estabilidad a partir de un análisis cinemático

- I** Círculo de fricción, estable.
- II** Combinación entre círculo de fricción y envolvente de Markland (daylight envelope), estable.
- III** Envolvente de Markland, inestable.
- IV** Zona de vuelco, inestable.
- V** No presenta inestabilidad, estable.

4.3.3 Tipos de mecanismos de falla en taludes

Para el análisis de estabilidad de los taludes en el área de estudio se analizan los mecanismos de inestabilidad tipo planar y cuña.

4.3.3.1 Deslizamiento Planar

El deslizamiento tipo planar ocurre a favor de una discontinuidad geológica preexistente ya sea la estratificación, juntas tectónicas, fallas, etc. Buza de forma paralela hacia la cara del talud y su echado es mayor que el ángulo del talud y su echado es mayor que el

ángulo de fricción (Figura 4.6). Este tipo de deslizamiento generalmente ocurre en macizos lutíticos o pizarrosos, aun que no se descarta en otro tipo de rocas.

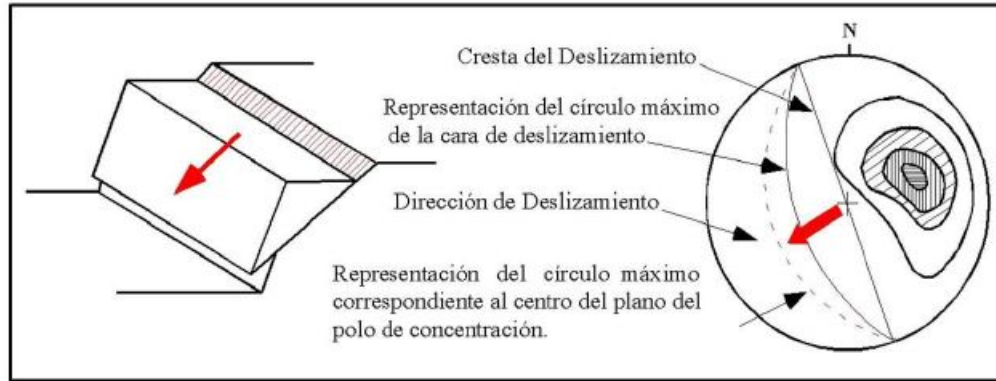


Figura 4.6. Rotura planar y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977)

A continuación se da un resumen de las condiciones que tienen que cumplirse para que ocurra un fallamiento de tipo Planar en un talud (Schuster, 1996):

1. El rumbo de la discontinuidad planar debe estar 20° dentro del rumbo de la cara del talud en ambas direcciones: $\alpha p = \alpha f \pm 20^\circ$
2. El echado de la discontinuidad planar debe ser menor que el echado de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara: $\psi p < \psi f$
3. El echado de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento: $\psi p > \phi p$

Los tres tipos de condiciones a evaluar se ilustran a continuación (Figura 4.7):

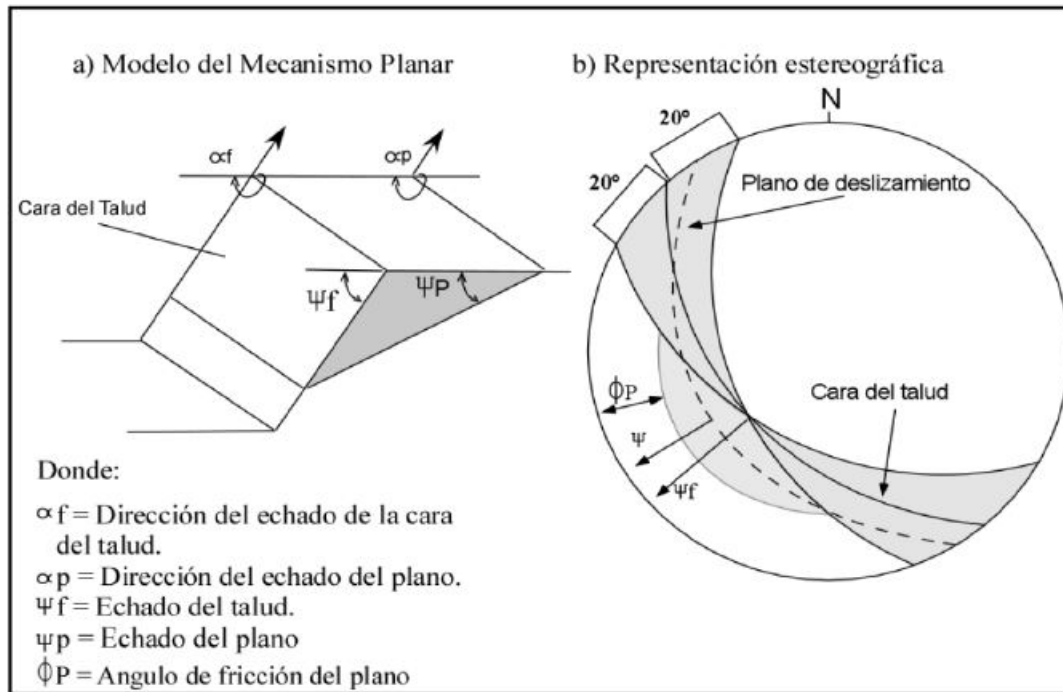


Figura 4.7. Falla tipo planar y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977)

4.3.3.2 Deslizamiento tipo Cuña

Este tipo de fallamiento o deslizamiento se produce por la combinación de al menos dos discontinuidades a favor de una línea de intersección que a su vez buza a favor de la cara del talud en un ángulo oblicuo, formando un bloque en forma de cuña (Hoek and Bray, 1977) (Figura 4.8). Comúnmente estas cuñas de material rocoso son expuestas por excavaciones las cuales hacen aflorar la línea de intersección al eje del deslizamiento, lo cual precipita el fallamiento.

La litología más propensa a desarrollar cuñas que otro tipo de rocas son las lutitas, limolitas en estratos delgados, arcilla, caliza y litología en capas. No obstante la litología no es un factor que influye en su formación (Piteau, 1972).

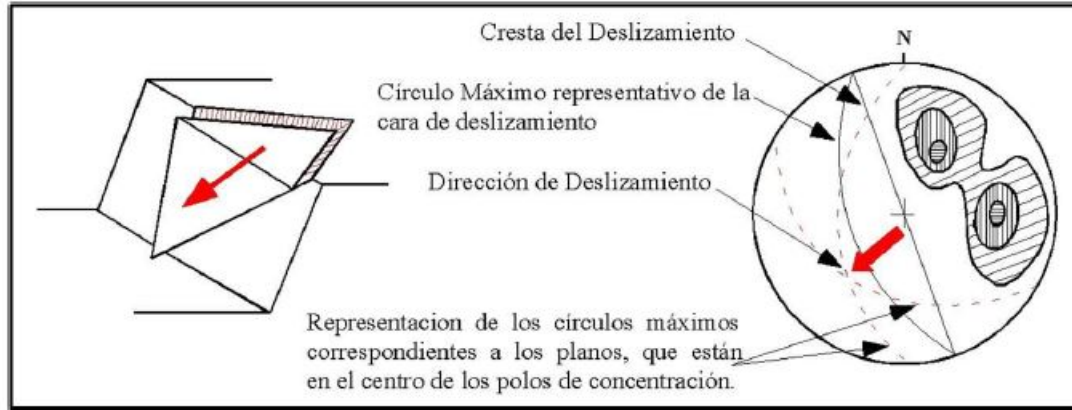


Figura 4.8. Falla tipo cuña y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977)

A continuación se enlistan las condiciones que se deben de cumplir para que ocurra un fallamiento o deslizamiento en cuña (Hoek and Bray, 1977) (Figura 4.9):

1. El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección de deslizamiento de la cara del talud: $\alpha_i = \alpha_f \pm (\text{debe aflorar hacia la cara del talud})$.
2. La inmersión de la línea de intersección debe ser menor que el echado de la cara del talud. Bajo esta condición, se dice que la Línea de intersección debe ser menor que el echado de la cara del talud: $\psi_i < \psi_f$.
3. La inmersión de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción de los planos de deslizamiento. Si los ángulos de fricción para ambos planos son marcadamente diferentes, un ángulo de ellos puede ser aplicable: $\phi < \psi_i$.

El Análisis Cinemático se encuentra gobernado por la orientación de la línea de intersección de los planos que delimitan la cuña. A este análisis se le denomina Markland Test (Hoek and Bray, 1977), el cual determina si el deslizamiento puede ocurrir. El postulado indica lo siguiente: Si α_a ó α_b están entre α_i y α_f , entonces el deslizamiento ocurre sobre el plano que tenga el valor más alto de echado.

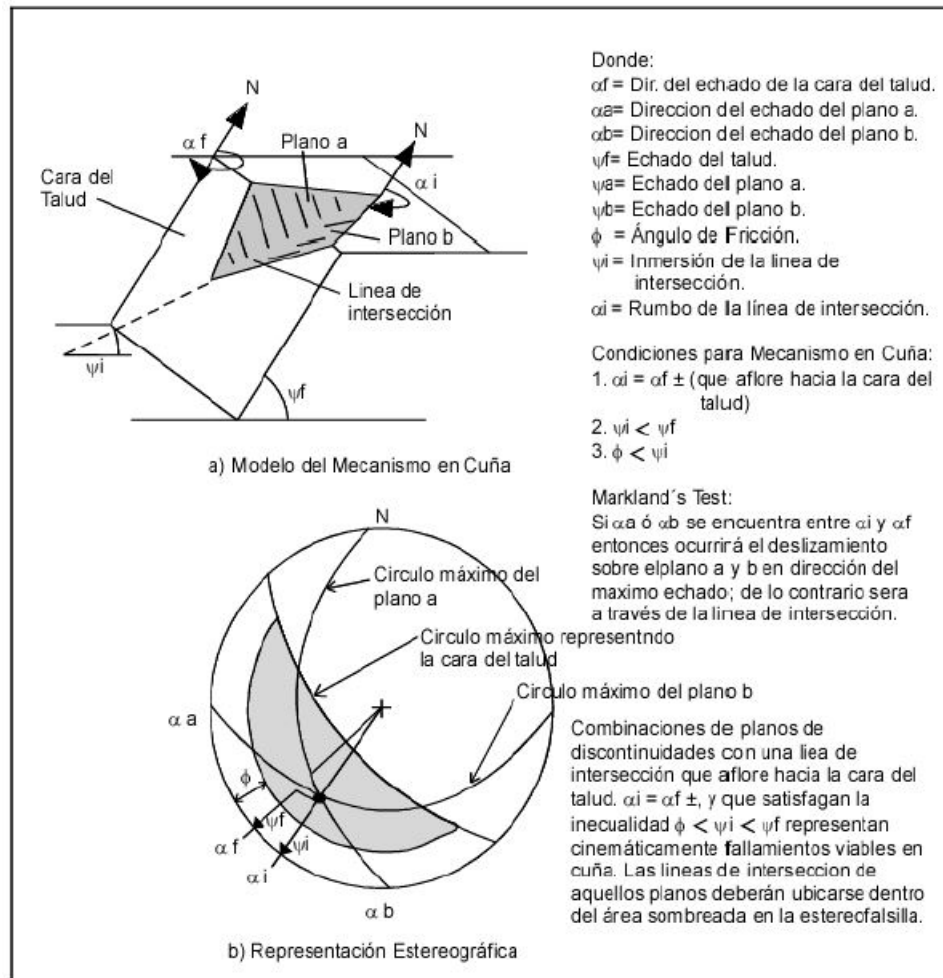


Figura 4.9. Falla tipo cuña y su representación estereográfica Hoek and Bray (1977)

4.3.4 Análisis Cinemático de Taludes dentro de la Zona de Estudio

Los taludes presentados a continuación se encuentran dentro del área de estudio dentro del municipio de San Pedro Garza García y pertenecen a una cantera inactiva. La litología fue descrita con anterioridad en el Capítulo 2. Es de suma importancia recalcar que la selección de los taludes se realizó por su similitud a zonas urbanizadas en el Cerro del Topo Chico, dentro del AMM. Además, al estar dentro de una misma cantera, en los tres taludes se usaron los mismos valores para la estratificación y las fracturas.

4.3.4.1 Talud 1

Se localiza a una altura de 763 m.s.n.m, dentro de la Formación Cuesta del Cura descrita en el Capítulo 2 (Figura 4.10). La altura del talud va incrementando conforme se acerca más al NE. Tiene una dirección de 209° y un echado de 86° .



Figura 4.10. Se puede observar la disposición de los estratos en un alto nivel de pendiente en su echado.

A continuación se realiza el análisis cinemático (Figura 4.11) en donde se observa que el plano de la estratificación y el polo de la J1 caen dentro de la zona de vuelco, por lo que se continua con la realización del análisis de viabilidad.

Valores

Talud = $209^\circ/86^\circ$

Estratificación = $118^\circ/73^\circ$

J1 = $24^\circ/76^\circ$

J2 = $229^\circ/39^\circ$

$\Phi_p = 40^\circ$

Condiciones cinemáticas para el mecanismo planar

1. $\alpha p = \alpha f \pm 20^\circ$
2. $\psi p < \psi f$
3. $\psi p > \phi p$

En el cual, para el caso del plano de estratificación son:

$$\alpha f = \text{Dirección del talud} = 209^\circ$$

$$\alpha p = \text{Dirección del plano} = 118^\circ$$

$$\psi f = \text{Echado del talud} = 86^\circ$$

$$\psi p = \text{Echado del plano} = 73^\circ$$

$$\phi p = \text{Ángulo de fricción} = 40^\circ$$

Y para el caso del plano de la J1 son:

$$\alpha f = \text{Dirección del talud} = 209^\circ$$

$$\alpha p = \text{Dirección del plano} = 24^\circ$$

$$\psi f = \text{Echado del talud} = 86^\circ$$

$$\psi p = \text{Echado del plano} = 76^\circ$$

$$\phi p = \text{Ángulo de fricción} = 40^\circ$$

Condiciones para la viabilidad (estratificación)

1. $118^\circ = 209^\circ \pm 20^\circ$
2. $73^\circ < 86^\circ$
3. $73^\circ > 40^\circ$

Condiciones para la viabilidad (J1)

1. $24^\circ = 209^\circ \pm 20^\circ$
2. $76^\circ < 86^\circ$
3. $76^\circ > 40^\circ$

Observando lo anterior, en ninguno de los dos casos se cumplen con las tres condiciones para que se produzca el fallamiento de tipo planar.

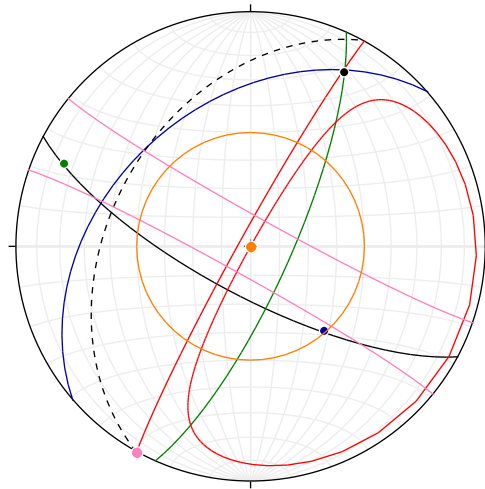


Figura 4.11. Estereograma de talud 1. Se muestran los diferentes elementos de acuerdo a los colores: Plano de Estratificación y su respectivo polo (línea en negro), plano de J1 y su respectivo polo (línea en verde), plano de J2 y su respectivo polo (línea en azul), plano de Talud y envolvente de falla (línea en rojo), planos de debilidad (línea en magenta), cono de fricción (línea en naranja) y en línea punteada el Círculo de Rozamiento.

4.3.4.2 Talud 2

Se localiza a una altura de 763 m.s.n.m, dentro de la Formación Cuesta del Cura descrita en el Capítulo 2 (Figura 4.12). La altura del talud no se conoce ya que este se esta definido por el plano de estratificación. Tiene una dirección de 132° y un echado de 58° .



Figura 4.12. Se puede observar un plano muy marcado. Este talud esta definido por el rumbo y buzamiento de la estratificación

En el análisis cinemático (Figura 4.13) se observa que una pequeña parte del plano de la J2 caen dentro de la zona de vuelco, por lo que se continua con la realización del análisis de viabilidad para este plano.

Valores

Talud = $132^\circ/58^\circ$

Estratificación = $118^\circ/73^\circ$

J1 = $24^\circ/76^\circ$

J2 = $229^\circ/39^\circ$

$$\Phi_p = 40^\circ$$

Las ecuaciones utilizadas en el talud anterior, serán analizadas con los valores de la siguiente manera:

$$\alpha_f = \text{Dirección del talud} = 132^\circ$$

$$\alpha_p = \text{Dirección del plano} = 229^\circ$$

$$\psi_f = \text{Echado del talud} = 58^\circ$$

$$\psi_p = \text{Echado del plano} = 39^\circ$$

$$\phi_p = \text{Ángulo de fricción} = 40^\circ$$

Condiciones para la viabilidad (J2)

1. $229^\circ = 132^\circ \pm 20^\circ$
2. $39^\circ < 58^\circ$
3. $39^\circ > 40^\circ$

De acuerdo al análisis, aunque el parte del plano se encuentra dentro de la zona de vuelco no se cumplen con las tres condiciones para que se produzca el fallamiento de tipo planar.

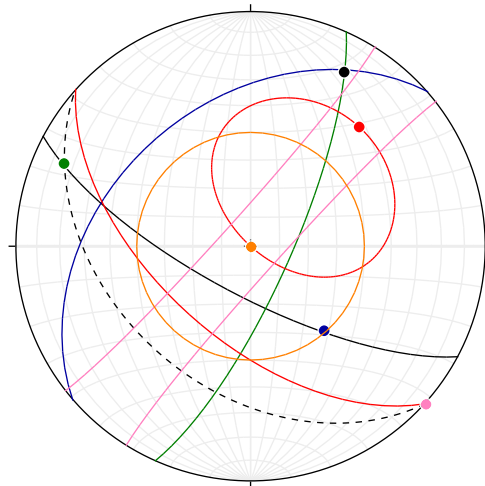


Figura 4.13. Estereograma de talud 2. Se muestran los diferentes elementos de acuerdo a los colores: Plano de Estratificación y su respectivo polo (línea en negro), plano de J1 y su respectivo polo (línea en verde), plano de J2 y su respectivo polo (línea en azul), plano de Talud y envolvente de falla (línea en rojo), planos de debilidad (línea en magenta), cono de fricción (línea en naranja) y en línea punteada el Círculo de Rozamiento.

4.3.4.3 Talud 3

Se localiza a una altura de 763 m.s.n.m, dentro de la Formación Cuesta del Cura descrita en el Capítulo 2 (Figura 4.14). La altura del talud va incrementando conforme se acerca más al NW. Tiene una dirección de 327° y un echado de 88° . En este talud se pueden observar evidencia de explotación (cavernas originadas de manera antropológica).



Figura 4.14. Se puede observar la disposición de los estratos en un alto nivel de pendiente en su echado.

En el análisis cinemático (Figura 4.13) se observa que el polo del plano de la J1 caen dentro de la envolvente de falla, una zona inestable por lo que se realiza el análisis de viabilidad para este plano.

Valores

Talud = $327^\circ/88^\circ$

Estratificación = $118^\circ/73^\circ$

J1 = $24^\circ/76^\circ$

J2 = $229^\circ/39^\circ$

$$\Phi_p = 40^\circ$$

Con respecto a este caso, los datos para el plano de la J1 son:

$$\alpha_f = \text{Dirección del talud} = 327^\circ$$

$$\alpha_p = \text{Dirección del plano} = 24^\circ$$

$$\psi_f = \text{Echado del talud} = 88^\circ$$

$$\psi_p = \text{Echado del plano} = 76^\circ$$

$$\phi_p = \text{Ángulo de fricción} = 40^\circ$$

Condiciones para la viabilidad (J1)

1. $24^\circ = 327^\circ \pm 20^\circ$
2. $76^\circ < 88^\circ$
3. $76^\circ > 40^\circ$

Según el análisis, aunque el polo del plano de l J1 se encuentra dentro de la envolvente de falla no se cumplen con las tres condiciones para que se produzca el fallamiento de tipo planar.

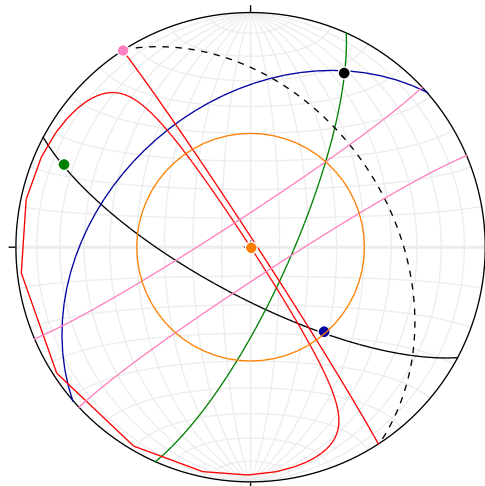


Figura 4.15. Estereograma de talud 3. Se muestran los diferentes elementos de acuerdo a los colores: Plano de Estratificación y su respectivo polo (línea en negro), plano de J1 y su respectivo polo (línea en verde), plano de J2 y su respectivo polo (línea en azul), plano de Talud y envolvente de falla (línea en rojo), planos de debilidad (línea en magenta), cono de fricción (línea en naranja) y en línea punteada el Círculo de Rozamiento.

Capítulo 5

Discusión, Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Discusión

Existen diferentes metodologías para la elaboración de cartas de riesgo. Esta tesis se enfocó solamente en cuestiones de Riesgo de índole Geológico. Para ello se utilizaron y analizaron dos diferentes metodologías en cuanto a la elaboración de cartas morfológicas, las cuales nos indican el grado de pendiente del área a estudiar.

Las metodologías utilizadas en esta tesis fueron la empleada por SEGOB (2016) y la empleada por Chapa Guerrero (1993). La primera divide el área estudiada en 6 zonas de acuerdo a los grados de pendiente, mientras que la segunda divide la zona de estudio en 3 zonas de acuerdo a sus grados de pendiente. Hay que tener en cuenta que la primera metodología mencionada es para la evaluación de procesos geomorfológicos y se usa a nivel nacional sin restricción aparente. Por el otro lado, la segunda metodología se realiza en función de las propiedades de las rocas, teniendo como base la roca más deleznable de la litología aflorante en el AMM, siendo esta las pertenecientes a la formación Méndez. Las rocas lutíticas de la formación Méndez, presentan un ángulo de fricción marcado en 18° , y con el fin de tener un mayor margen de seguridad el rango de pendiente más alto se maneja por arriba de los 15° .

Ambas metodologías fueron utilizadas para realizar las cartas de riesgo geológico dando una diferencia de 7 zonas de riesgo entre ambas, 18 zonas de riesgo para la metodología de SEGOB (2016) y 11 zonas de riesgo para la metodología empleada por Chapa Guerrero (1993), en ambas se toma la zona de arroyos (drenaje natural) como una zona de riesgos.

Cabe destacar que, si bien, el área estudiada en esta tesis no cuenta con las rocas de la formación Méndez aflorando, estas forman parte de la columna estratigráfica presente en la zona.

Analizando la diferencia de zonas de riesgo, se logró detectar que en la metodología de SEGOB (2016) incrementaba el número de zonas morfológicas y/o susceptibilidad por ende incrementaba el número de riesgo, pero a su vez solo hacía más específica las zonas. Es decir, bajo esta metodología existen zonas muy puntuales que para un trabajo de investigación como este es mejor englobar en una zona mayor, y en otros casos las zonas de riesgo estaban en sitio donde a misma morfología dificulta demasiado su acceso. No se descarta ni se trata a dar entender que no existiría algún fenómeno en estas ultimas zonas. Al contrario, se entiende que en estos lugares tienden a existir Movimientos en Masa, sobre todo caídos y rodamientos de bloques de tamaño considerable, pero al igual que las zonas puntuales, éstas se pueden englobar en una zona de riesgo similar.

Debido a las características mostradas por la metodología de Chapa Guerrero (1993), en la cual, las zonas de riesgo puntuales mencionadas en el párrafo anterior se pueden englobar de mejor manera y siendo utilizadas dentro de la misma provincia geológica, se decidió resaltar su uso para los trabajos realizados en el AMM. Existen algunos otros trabajos de investigación y/o tesis en las que también se utiliza esta metodología o una metodología similar, por lo que además de presentar una visión más global de ciertas áreas, es una buena manera de unificar los diferentes trabajos de esta asignatura bajo una misma tónica.

En ningún momento se trata de menospreciar o minimizar la metodología de SEGOB (2016), solo se busca un mejor entendimiento del área estudiada y los sitios de mayor riesgo con base en una metodología más propia de la región.

5.2 Conclusiones y Recomendaciones

De acuerdo con la metodología usada (Chapa Guerrero, 1993), se encontraron 11 zonas de riesgo geológico dentro del área de estudio, estas zonas de riesgo son:

- **Zona de Riesgo 1.-** Zona urbanizada con pendiente de $0a5^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 2.-** Zona urbanizada con pendiente de $5a15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 3.-** Zona urbanizada con pendiente de $> 15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 4.-** Material Paleógeno - Cuaternario con pendiente de $0a5^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 5.-** Material Paleógeno - Cuaternario con pendiente de $5a15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 6.-** Material Paleógeno - Cuaternario con pendiente de $> 15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 7.-** Caliza arcillosa con pendiente de $5a15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 8.-** Caliza arcillosa con pendiente de $> 15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 9.-** Caliza con pendiente de $5a15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 10.-** Caliza con pendiente de $> 15^{\circ}$
- **Zona de Riesgo 11.-** Arroyos

De las cuales 7 de estas son las zonas de mayor riesgo. A continuación se expondrán los fenómenos a los cuales están expuestos los elementos que existen o pudieran existir en estas zonas así como su recomendación.

5.2.1 Zona de Riesgo 1 (Zona urbanizada con pendiente de 0a5°)

Es la parte del área de estudio donde la zona urbana tiene la menor pendiente (pendiente suave). No aflora ninguna formación rocosa en el área pues estas se encuentran por debajo de la infraestructura civil de la ciudad.

5.2.1.1 Riesgo

Dentro del capítulo de cartografía se logra observar que algunos arroyos alimentadores del Arroyo del Obispo se encuentran cortados u obstaculizados por asentamientos civiles (colonias). Esto ocasiona que en esta zona se puedan presentar flujos de detritos por arrastre en los cauces de dichos arroyos. En el pasado estos sitios ya han presentado problemas de este tipo, en los cuales se presentan daños a edificaciones tipo casa habitación, infraestructura publica (carpeta asfáltica, alumbrado, etc.) y daños a bienes privados (automóviles).

5.2.1.2 Recomendaciones

Para este tipo de sitios se recomienda un encausamiento bien definido directo a su arroyo alimentado y mantener despejado de cualquier tipo de obstáculo que pueda crear una zona de represionamiento.

5.2.2 Zona de Riesgo 2 (Zona urbanizada con pendiente de 5a15°)

Es la parte del área de estudio donde la zona urbana tiene una pendiente pronunciada. No aflora ninguna formación rocosa en el área pues estas se encuentran por debajo de la infraestructura civil de la ciudad.

5.2.2.1 Riesgo

Dentro de esta zona la afectación se da por deslizamiento de flujos de material en época de lluvias en zona urbana, sobre todo en zonas cercanas a un drenaje natural o zonas cercanas a grandes cúmulos de material de origen Paleógeno - Cuaternario no cementado. En el pasado estos sitios ya han presentado problemas de este tipo, en los

cuales se presentan daños a edificaciones tipo casa habitación, infraestructura publica (carpeta asfáltica, alumbrado, etc.) y daños a bienes privados (automóviles).

5.2.2.2 Recomendaciones

En algunos puntos de esta zona se han logrado observar la colocación de barreras elaboradas con gaviones o muros de contención con drenes para evitar el flujo de material pendiente abajo. Esta es una buena medida que puede utilizarse en los puntos que tienen la misma problemática.

5.2.3 Zona de Riesgo 5 (Material Paleógeno - Cuaternario con pendiente de $5a15^\circ$)

Es la parte del área de estudio donde no existe urbanización y tiene una pendiente pronunciada. En esta zona aflora material Paleógeno - Cuaternario descrito en el capítulo 3.

5.2.3.1 Riesgo

La afectación dentro de esta zona de riesgo se da por deslizamiento de flujos de material, sobre todo en zonas cercanas a un drenaje natural o zonas cercanas a grandes cúmulos de material no cementado en época de lluvias. Estos procesos se dan por la saturación de los suelos, lo que les quita cohesividad entre ellos. De la misma manera pudiera existir la presencia de un rodamiento de bloque procedente de una zona con mayor altitud.

5.2.3.2 Recomendaciones

En caso de construcción se debe de tener en cuenta las zonas cercanas a arroyo y sus márgenes, así como el espesor de la capa de material. Se puede utilizar la problemática presente dentro del zona de riesgo 2, para contemplar posibles daños de no tomar en cuenta recomendaciones.

5.2.4 Zona de Riesgo 8 (Caliza arcillosa con pendiente de $> 15^\circ$)

Es la parte del área de estudio donde no existe urbanización y tiene una pendiente muy pronunciada. En esta zona afloran rocas de las formaciones Agua Nueva y Cuesta del Cura, las cuales son Calizas de medianas a delgadas y algún contenido arcilloso, están descritas en el capítulo 3.

5.2.4.1 Riesgo

En zona de riesgo presenta algunas canteras inactivas. Debido a la configuración geológica - estructural, además de las zonas de debilidad provocadas por la actividad de explotación de calizas, existe el riesgo de movimientos en masa del tipo de flujos de material de zonas de mayor latitud, así como desprendimientos de roca en tipo cuña o planar.

5.2.4.2 Recomendaciones

Dado que se encuentra en una zona de alta susceptibilidad de peligros, se recomienda evitar la construcción en zona. Existen algunas colonias dentro de AMM que se encuentran dentro de antiguas canteras de explotación de calizas. en algunas de ellas se han presentado flujos y caídos de material dañando edificaciones tipo casa habitación, infraestructura publica (carpeta asfáltica, alumbrado, etc.) y daños a bienes privados (automóviles).

5.2.5 Zona de Riesgo 9 (Caliza con pendiente de $5a15^\circ$)

Es la parte del área de estudio donde no existe urbanización y tiene una pendiente pronunciada. En esta zona afloran rocas de las formaciones Cupido, La Peña y Aurora, las cuales son Calizas de estratos de medianos a gruesas, están descritas en el capítulo 3.

5.2.5.1 Riesgo

En zona de riesgo, al igual que la zona de riesgo 8, presenta algunas canteras inactivas. Debido a la configuración geológica - estructural, además de las zonas de debilidad provocadas por la actividad de explotación de calizas, existe el riesgo de movimientos en

masa del tipo de flujos de material de zonas de mayor latitud, así como desprendimientos de roca en tipo cuña o planar. De la misma manera existe evidencia de Movimientos en Masa muy antiguos con una gran área de afectación, dentro de los cuales existen relictos (grandes bloques de roca para autóctonos).

5.2.5.2 Recomendaciones

Dado que se encuentra en una zona de alta susceptibilidad de peligros del tipo de rodamientos de bloques de gran tamaño, se recomienda dejar esta zona de riesgo libre de construcción alguna.

5.2.6 Zona de Riesgo 10 (Caliza con pendiente de $> 15^\circ$)

Es la parte del área de estudio donde no existe urbanización y tiene una pendiente muy pronunciada. En esta zona afloran rocas de las formaciones Cupido, La Peña y Aurora, las cuales son Calizas de estratos de medianos a gruesas, están descritas en el capítulo 3.

5.2.6.1 Riesgo

En zona de riesgo presenta algunas canteras inactivas. Debido a la configuración geológica - estructural existe el riesgo de movimientos en masa del tipo, flujos de material de zonas de mayor latitud, así como desprendimientos de roca en tipo cuña, planar o cabeceos. Estos cabeceos pueden debido al cambio de buzamiento en las capas de caliza de la formación Cupido. El buzamiento (inclinación) de los estratos se vuelve más vertical en las partes más altas, lo que produce que el estrato se vuelque.

5.2.6.2 Recomendaciones

Esta zona suele considerarse estable debido a sus condiciones geológicas pero se encuentra en una zona de alta susceptibilidad de peligros del tipo de rodamientos de bloques de gran tamaño y de cabeceos de roca. Se recomienda dejar esta zona de riesgo libre de construcción alguna.

5.2.7 Zona de Riesgo 11 (Arroyos)

Los arroyos en el área en estudio cursan de forma radial debido a la forma semi - cómica de la estructura del Cerro de Las Mitras. La mayor parte del año no transportan fluidos, ya que estos arroyos conducen solo en épocas de lluvias y ciclones con gran cantidad de agua con lodos y material suelto de diferente tamaño.

5.2.7.1 Riesgo

Debido a las lluvias torrenciales que actúan en la región del AMM y las fuertes pendientes con las que cuentan estos arroyos se provoca una alta erosión dentro de estos, así como márgenes de estos. Consecuentemente todas las construcciones situadas sobre un arroyo o directamente a los márgenes del mismo están en grave riesgo.

5.2.7.2 Recomendaciones

Se recomienda dejar esta zona de riesgo libre de construcción alguna. En cuanto a los márgenes de estos, se debe de contar con una distancia prudente que sirva como zona de seguridad. La cual debe ser estudiada para cada arroyo en particular. En comunicación personal con el Dr. Chapa Guerrero, se analizó que dentro de los márgenes de los arroyos se pueden encontrar tres zonas de riesgo de la siguiente manera según la configuración amplia o cerrado de estos.

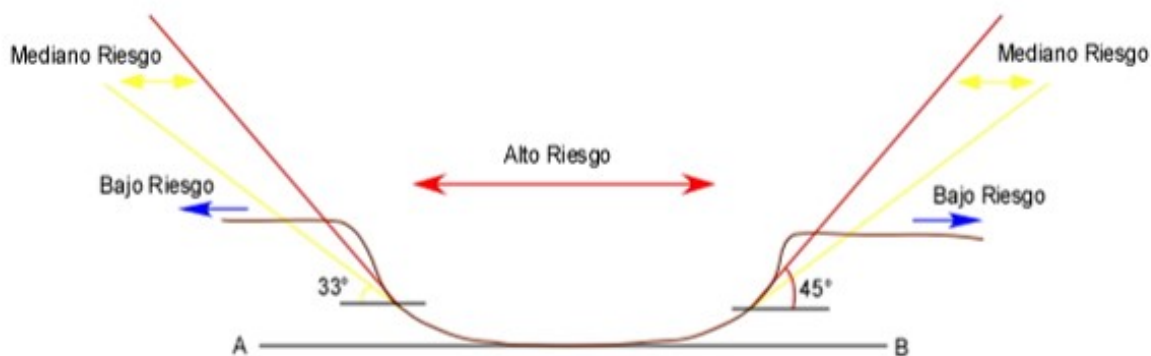


Figura 5.1. Distancia para zona de seguridad en márgenes de arroyo amplio

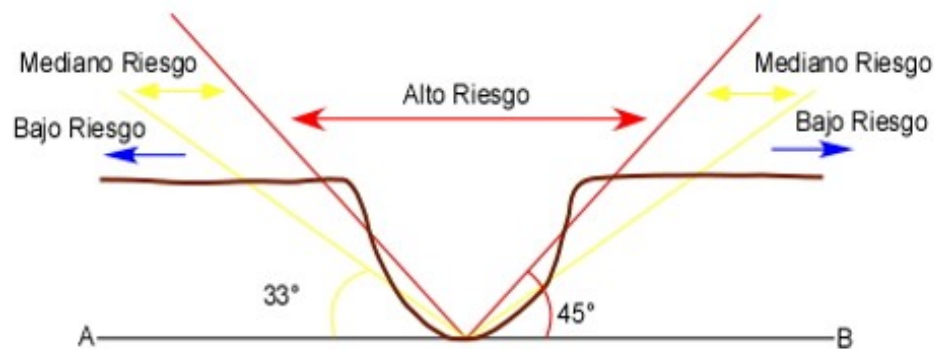


Figura 5.2. Distancia para zona de seguridad en márgenes de arroyo cerrado

5.2.8 Otras conclusiones

La zonificación de Riesgos Geológicos bajo esta metodología permite visualizar de manera general eventos que pudieran afectar la infraestructura establecida o a establecer en éstas áreas, nunca llegara a suplir los trabajos geológicos – geotécnicos adecuados para construcciones particulares. En cierta medida la misma decisión de utilizar una metodología que no tomara las zonas de riesgo de una manera tan puntual ayuda a evitar prácticas de evasión de responsabilidad constructil.

La cantidad de precipitación y la mala planeación de los desarrollos habitacionales son la principal causa de la activación de los desastres que pueden ocurrir por la presencia de flujos en la zona.

Este tipo de trabajos sirven de referencia para conocer la problemática adquirida en desarrollos urbanos sin la planificación adecuada, y pueden ser usando como sitios análogos para futuras zonas a urbanizar.

Bibliografía

- Bieniawski, Z. T. and Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Brunetti, M. (2014). *Statistics of terrestrial and extraterrestrial landslides*. PhD thesis, PhD Thesis. 10.13140/2.1. 4107.3444.
- Chapa Arce, R. I. (2017). *Análisis de estabilidad de taludes mediante la revisión cinemática del macizo rocoso en la zona poniente de Monterrey (Cerro de la Loma Larga y Mitras), Nuevo León, México*. PhD thesis, Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 151pp.
- Chapa Guerrero, J. (1993). Massenbewegungen an steilhängen der sierra madre oriental in grossraum monterrey, mexiko. *RWTH Mitt. Fur Ing. Geol. U. Hydrogeol*, 54.
- Chapa Guerrero, J., Meiburg, P., and Schetelig, K. (1994). Estabilidad de taludes escarpados, sierra madre oriental, nl, méxico. *Zbl Geol Paläont Teil I*, pages 1019–1026.
- Chapa Guerrero, J., Meiburg, R., and Scheteling, K. (1993). Riesgos geológicos en la sierra madre oriental (estado de nuevo león), méxico.
- Chávez-Cabello, G. (2005). Deformación y magmatismo cenozoico en el sur de la cuenca de sabinas, coahuila, méxico. *Facultad de Ciencias de la Tierra/UANL*.
- Chávez-Cabello, G., Cossío-Torres, T., and Peterson-Rodríguez, R. H. (2004). Change of the maximum principal stress during the laramide orogeny in the monterrey salient,

- northeast méxico. *Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses: Geological Society of America, Special Paper*, 383:145–159.
- Chávez Cabello, G., Torres Ramos, J. A., Vázquez, P., Damián, N., Cossio Torres, T., and Aranda Gómez, J. J. (2011). Evolución estructural del frente tectónico de la sierra madre oriental en el cañón santa rosa, linares, nuevo león. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2):253–270.
- Clark, K., Damon, P., Shafiquillah, M., Ponce, B., and Cárdenas, D. (1981). Sección geológica-estructural a través de la parte sur de la sierra madre occidental, entre fresnillo y la costa de nayarit: Asociación ingenieros de minas. *Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria Técnica*, 14:69–99.
- Coney, P. (1976). Plate tectonics and the laramide orogeny. *Tectonics and Mineral Resources of Southwestern North America. New Mexico Geol. Soc. Special Publication*, (6):5–10.
- Coney, P. J. and Reynolds, S. J. (1977). Cordilleran benioff zones. *Nature*, 270(5636):403.
- de Santa Catarina, G. M. (2015). Programa municipal de desarrollo urbano 2015.
- Dickinson, W. and Snyder, W. (1978). Laramide folding associated with basement block faulting in the western united states. *Plate Tectonics of the Laramide Orogeny*, 151:355–366.
- Eguiluz De Antuñano, S., Aranda-García, M., and Marrett, R. (2000). Tectónica de la sierra madre oriental. *México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1):1–26.
- Ferrer, M. (1991). Mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. *I Bienal Española de Ingeniería Geológica y Minera*, I.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., and Chávez-Cabello, G. (2018). The cretaceous-paleogene mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183:56–84.

- Goldhammer, R. and Johnson, C. (1999). Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, pages 1–58.
- Goldhammer, R., Lehmann, P., Todd, R., Wilson, J., Ward, W., and Johnson, C. (1991). Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental. *Northeast Mexico*.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., and Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Hancock, P. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of structural geology*, 7(3-4):437–457.
- Hoek, E. and Bray, J. (1977). Rock slope engineering, 2nd. Edn., *The Institute of Mining and Metallurgy, London*, 527.
- Humphrey, W. E. (1949). Geology of the Sierra de los Muertos area, Mexico (with descriptions of Aptian cephalopods from the La Peña formation). *Geological Society of America Bulletin*, 60(1):89–176.
- Imlay, R. W. (1936). Part IV. Geology of the western part of the Sierra de Parras. *Bulletin of the Geological Society of America*, 47(7):1091–1152.
- Imlay, R. W. (1937). Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 48(5):587–630.
- International Association of Engineering Geology, C. O. E. G. M. (1976). *Engineering geological maps: a guide to their preparation*, volume 15. Paris, Unesco Press.
- Markland, J. T. (1972). *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected*. Interdepartmental Rock Mechanics Project, Imperial College of Science and

- Meiburg, P., Chapa-Guerrero, J., Grotehusmann, I., Kustusch, T., Lentzy, P., de León-Gómez, H., and Mansilla-Teran, M. (1987). El basamento precretácico de aramberri-estructura clave para comprender el décollement de la cubierta jurásica/cretácica de la sierra madre oriental. *Actas Facultad de Ciencia de la Tierra*, 2:15–22.
- Michalzik, D. (1988). *Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexiko: fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes*. na.
- Montalvo-Arrieta, J., Chávez-Cabello, G., Velasco-Tapia, F., and Navarro de León, I. (2010). Causes and effects of landslides in the monterrey metropolitan area, ne mexico. *Landslides: causes, types and effects*. Nova Science Publishers, New York, pages 73–104.
- Padilla y Sánchez, R. (1982). *Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo, and Monterrey, Mexico: Austin, Texas, EUA, The University of Texas at Austin*. PhD thesis, Tesis doctoral, 217 p.
- Padilla y Sánchez, R. (1985). Las estructuras de la curvatura de monterrey. *Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí: Revista del Instituto de Geología UNAM*, 6:1–20.
- Padilla y Sánchez, R. et al. (1986). Post-paleozoic tectonics of northeast mexico and its role in the evolution of the gulf of mexico. *Geofísica Internacional*, 25(1).
- Palmström, A. (1982). The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of rock jointing. *Proc. 4th Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol*, 5:221–228.
- Piteau, D. R. (1972). Engineering geology considerations and approach in assessing the stability of rock slopes.
- Price, N. J. and Cosgrove, J. W. (1990). *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press.
- Reuter, F., Klengel, K. J., and Pašek, J. (1978). *Ingenieurgeologie: mit 133 Tab*. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie.

- Sánchez Carlín, E. (2001). *Riesgos geológicos en la porción noroeste del Cerro de la Silla, Monterrey, NL, México*. PhD thesis, Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 83pp.
- Sanchez-Castillo, L., Kubota, T., Cantú-Silva, I., Moriyama, T., et al. (2017). A probability method of rainfall warning for sediment-related disaster in developing countries: a case study in sierra madre oriental, mexico. *Natural Hazards*, 85(3):1893–1906.
- Schuster, R. L. (1996). *LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION. CHAPTER 2-SOCIOECONOMIC SIGNIFICANCE OF LANDSLIDES*. Number 247.
- SEGOB, S. (2016). Términos de referencia para la elaboración de atlas de peligros y/o riesgos 2016. *Diario Oficial de la Federación*.
- Talobre, J. (1957). La mécanique des roches (rock mechanics). *Dunop, Paris*, 230.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176:11–33.
- Wilson, J. (1986). Basement structural controls on mesozoic carbonate facies in northeastern mexico—a review. *Carbonate Platforms: Facies, Sequences and Evolution*, pages 235–255.